



Control Bidireccional de una Batería Implementado en el Sistema Typhoon HIL

Siza Hilaño, Jairo Joel y Sumba Guamán, Henry Roberto

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y
Automatización

Ing. Llanos Proaño, Jaqueline del Rosario. PhD

30 de agosto del 2023

Latacunga



TESIS_FINAL_C_BATERIAS_VF_DB_sim3...

Scan details

Scan time:
August 30th, 2023 at 12:29 UTC

Total Pages:
69

Total Words:
17160

Plagiarism Detection

Types of plagiarism	Words
Identical	0.6% 105
Minor Changes	0.7% 114
Paraphrased	3.2% 545
Omitted Words	9.1% 1558

4.9%

AI Content Detection

Text coverage
AI text
Human text

N/A

Plagiarism Results: (27)

<p> T-EPEL-ENI-0507.pdf 1.2%</p> <p>https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/35947/1/t-e...</p> <p>ASUS</p> <p>1 Carátula Diseño e implementación de un algoritmo de control de un inversor DC/AC en un Sistema Typhoon HIL. Pilatasig Chaicaiza, Jés...</p>
<p> Simulación mediante Psim de algoritmos de seguim... 0.6%</p> <p>https://1library.co/document/y81e8r2z-simulacion-mediante...</p> <p>...</p>
<p> Circuito De Carga Constante En Sistema De Voltaje ... 0.5%</p> <p>https://electropreguntas.com/que-es-un-circuito-de-carga-co...</p> <p>Javired</p> <p>Inicio Conceptos Componentes Dispositivos Herramientas Materiales Tutoriales Contacto ...</p>

Firma:

Jacqueline Proaño P.

Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario. PhD

C. C.: 0502527039

Certified by

About this report
help.copleaks.com

copleaks.com



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Control Bidireccional de una Batería Implementado en el Sistema Typhoon HIL.”** fue realizado por los señores **Siza Hilaño, Jairo Joel** y **Sumba Guamán, Henry Roberto**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 30 de agosto de 2023

Firma:

Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario. PhD

C. C.: 0502527039



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Siza Hilaño, Jairo Joel** con cédula de ciudadanía n° 1804468377 y **Sumba Guamán, Henry Roberto**, con cédula de ciudadanía n° 0503373680, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Control Bidireccional de una Batería Implementado en el Sistema Typhoon HIL**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 30 de agosto del 2023

Firma:

.....
Siza Hilaño, Jairo Joel

C. C.: 1804438377

.....
Sumba Guamán, Henry Roberto

C. C.: 0503373680



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Autorización de Publicación

Nosotros, **Siza Hilaño, Jairo Joel**, con cédula de ciudadanía n° 1804468377 y **Sumba Guamán, Henry Roberto**, con cédula de ciudadanía n° 0503373680, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Control Bidireccional de una Batería Implementado en el Sistema Typhoon HIL**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad

Latacunga, 30 de agosto del 2023

Firma:

.....
Siza Hilaño, Jairo Joel

C. C.: 1804438377

.....
Sumba Guamán, Henry Roberto

C. C.: 0503373680

Dedicatoria

Dedicada a mi madre María Nicolasa Guamán, quien siempre creyó en mí, si pudieras verme ahora...

A mi hijo Joaquin, la única raíz que me mantiene conectado a este mundo, quien es mi mayor fuente de inspiración para todo en esta vida hoy y hasta el último de mis días.

A mi esposa Mayra, no me va a alcanzar la vida para amarte.

A mis hermanos y hermanas Gabriel, Javier, David, Rosa, Pilar, Jisela, y Gabriela, la familia siempre está para lo que sea.

A mis sobrinos, que esto les sirva de motivación y punto de partida para sus propios logros.

Henry Sumba

Agradecimiento

Agradezco a la vida por haberme dado la oportunidad de conocerte, haber coincidido en una vida contigo, haber aprendido de ti todo lo que soy, y sobre todo le agradezco a la vida por haberme permitido sostener tu mano hasta tu último suspiro, te doy gracias a ti, María Nicolasa Guamán...
Mi más hermosa Borboleta.

Mayra y Joaquin Gracias, por soportar junto a mí las veladas y amanecidas de estos últimos meses

Mis agradecimientos infinitos a todas las personas que apoyaron esta cruzada académica, todo mi círculo familiar; Balbina, Isidro, Hernán, Gabriel, Javier, David, Rosa, Pilar, Jisela, Gabriela, Jeny, Don Franklin, Sra Magdalena y Santiago.

Un agradecimiento especial, sincero, respetuoso y cordial a la Ing Jacqueline Llanos (PhD) quien con su paciencia conocimiento y dedicación hizo posible la culminación de este trabajo, fue una experiencia enriquecedora y espero haber estado a la altura de su pasión por la docencia.

Finalmente quiero agradecer a todos los buenos amigos ingenieros y estudiantes que hice a lo largo de esta etapa recordando las palabras de uno de ellos "Aprende a perderle el miedo y sobre todo jamás abandones"

Henry Sumba

Dedicatoria

Dedica a mis padres quienes con su apoyo inquebrantable y sacrificios han sido mi fuente de inspiración constante a lo largo de mi camino académico.

A mi hermano quien a la distancia siempre me apoyo y motivó para seguir adelante sin importar las adversidades, el mismo que ha sido mi mayor ejemplo para seguir.

A mi hermana y sobrinos quienes con sus ocurrencias supieron entregarme alegría en mis días universitarios, devolviéndome la paz y tranquilidad.

Jairo Siza

Agradecimiento

Mi más sincero agradecimiento a mi padre William por el apoyo incondicional, paciencia y constante motivación, siendo un pilar fundamental sobre la cual construí este trabajo. A mi madre querida Blanca su apoyo constante han sido fuerza para perseguir mis metas y sueños. A mi hermana y sobrinos quienes son mi fuente de motivación para seguir adelante. A mi hermano Geovani por sus consejos y palabras de motivación en momentos difíciles. También quiero agradecer a la Ingeniería Jacqueline Llanos cuya orientación, paciencia y dedicación fueron fundamentales para dar forma y mejorar este trabajo, además de sus sugerencias y comentarios que han elevado la calidad de este trabajo de manera significativa.

Jairo Siza

ÍNDICE DE CONTENIDO

Caratula	1
Reporte de Verificación de Contenido.....	2
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Dedicatoria	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	13
Índice de tablas.....	15
Resumen.....	16
Abstract	17
Capítulo I: Introducción.....	18
Antecedentes.....	18
Planteamiento del problema y justificación	21
Objetivos.....	23
<i>Objetivo general</i>	23
<i>Objetivos específicos</i>	23
Hipótesis	24
Capítulo II: Fundamento Teórico.....	25
Batería.....	25
<i>Clasificación de las baterías</i>	25
<i>Características y componentes de las baterías</i>	26
Baterías de Plomo-Acido	28
Baterías de Níquel-Cadmio	28
Baterías de Litio	29

Interrupor de estado solido	29
Convertor Buck-Boost.....	30
<i>Análisis con el interruptor cerrado</i>	31
<i>Análisis con el interruptor abierto</i>	32
Filtro RC salida del Convertor Buck-Boost.....	34
Entorno Typhoon HIL	35
<i>Funcionalidades de Typhoon HIL</i>	35
<i>Interfaz gráfica de software Typhoon HIL</i>	35
<i>Gestor de dispositivos</i>	37
<i>Editor esquemático</i>	38
<i>Interfaz de trabajo</i>	39
<i>Interfaz de desarrollo SCADA</i>	40
Capítulo III: Diseño de un control bidireccional	42
Convertor bidireccional Buck-Boost DC/DC.....	42
<i>Modelamiento del convertidor en modo Boost</i>	42
<i>Modelamiento del convertidor en modo Buck</i>	44
Diagrama completo de un convertor Buck-Boost DC/DC	45
Controlador para un convertor Buck-Boost DC/DC de Baterías	46
<i>Arquitectura del controlador bidireccional para batería</i>	47
<i>Diseño de los controladores bidireccionales</i>	49
Capítulo IV: Implementacion del control bidireccional en sistema Typhoon.....	53
Diagrama esquemático del control bidireccional.....	53
<i>Configuración de la batería</i>	54
<i>Diseño del convertor bidireccional Buck-Boost</i>	55
<i>Componente IGBT Leg</i>	55
<i>Diselño del Convertor Buck-Boost DC/DC en Typhoon HIL</i>	58

<i>Configuración del Filtro RC en Typhoon HIL</i>	59
<i>Implementación del controlador bidireccional Buck-Boost DC/DC</i>	59
Capítulo V: Implementación experimental del control bidireccional	62
Configuraciones de software requerido para la implementación	62
<i>Configuraciones de comunicación entre Simulink y la DSP</i>	62
Características de la tarjeta DSP TMDSCNCD28335	63
Estructura de comunicación entre dispositivos.	64
<i>Programación del controlador en simulink</i>	65
<i>Implementación del algoritmo de control PI para control bidireccional</i>	66
Conexión del dispositivo H402 con el ordenador	68
Transferencia del controlador hacia la DSP	68
Transferencia de la planta al sistema Typhoon HIL H402	69
Diseño de la Interfaz HMI para monitoreo de HIL SCADA	71
Capítulo VI: Análisis y discusión de resultados	72
Resultados simulados en Typhoon HIL	72
Resultados experimentales en Typhoon HIL H402 y DSP	76
HMI SCADA de supervisión del controlador bidireccional.....	81
<i>Acondicionamiento de señales por parte de Simulink y Typhoon HIL</i>	82
Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones	84
Conclusiones.....	84
Recomendaciones.....	86
Bibliografía	88
Anexos.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Curvas características de una batería</i>	27
Figura 2	<i>Convertor Buck-Boost básico</i>	30
Figura 3	<i>Equivalente del circuito cuando el interruptor está cerrado</i>	31
Figura 4	<i>Equivalente del circuito cuando el interruptor está abierto</i>	32
Figura 5	<i>Convertor Bidireccional Bukc-Boost de IGBT's</i>	34
Figura 6	<i>Filtro RC</i>	34
Figura 7	<i>Typhoon HIL Solutions</i>	35
Figura 8	<i>Interfaz de usuario Typhoon HIL</i>	37
Figura 9	<i>Gestor de dispositivos Typhoon HIL</i>	38
Figura 10	<i>Editor Esquemático de Typhoon HIL</i>	39
Figura 11	<i>Interfaz de Typhoon HIL</i>	40
Figura 12	<i>Interfaz de desarrollo de SCADA</i>	41
Figura 13	<i>Diagrama del Convertor en modo Boost (Elevador)</i>	43
Figura 14	<i>Diagrama de convertor modo Buck (Reductor)</i>	44
Figura 15	<i>Diagrama completo de convertor Buck-Boost Bidireccional</i>	46
Figura 16	<i>Control Bidireccional para Batería</i>	49
Figura 17	<i>Controlador de corriente</i>	50
Figura 18	<i>Controlador de carga</i>	51
Figura 19	<i>Controlador de descarga</i>	51
Figura 20	<i>Selector de carga o descarga switch</i>	52
Figura 21	<i>Esquema completo de control bidireccional para batería en Typhoon HIL</i>	54
Figura 22	<i>Batería configurada en Typhoon HIL</i>	55
Figura 23	<i>Componente de dos interruptores IGBT Leg</i>	56
Figura 24	<i>Estructura interna de componente IGBT Leg</i>	56
Figura 25	<i>Funcionamiento del IGBT</i>	57

Figura 26 Configuración de IGBT's individuales	58
Figura 27 Conversor Bidireccional Buck-Boost.....	58
Figura 28 Filtro RC a la salida del conversor Buck-Boost.....	59
Figura 29 Diagrama de control para el conversor bidireccional	61
Figura 30 Softwares para comunicar Matlab y DSP.....	62
Figura 31 Configuraciones en Simulink	63
Figura 32 Tarjeta DSP TMDSCNCD28335	64
Figura 33 Programación de controlador bidireccional en Simulink.....	66
Figura 34 Esquema de control desarrollado en Simulink.....	67
Figura 35 Conexión física entre H402 y PC.....	68
Figura 36 Carga de los controladores en la DSP.....	69
Figura 37 Configuración de entradas digitales de elementos en Typhoon HIL.....	70
Figura 38 Actualización de firmware de dispositivo H402	71
Figura 39 HMI SCADA de controlador bidireccional	71
Figura 40 Sistema simulado en Typhoon HIL, visualizado en Simulink.....	72
Figura 41 Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC con 8Ω	73
Figura 42 Interfaz de simulación desde Typhoon HIL, respuesta en Simulink	74
Figura 43 Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC con variación	75
Figura 44 Interfaz de envío y recepción de datos desde Typhoon HIL hacia Simulink.....	77
Figura 45 Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC con 8Ω	78
Figura 46 Interfaz de envío y recepción de datos desde Typhoon HIL hacia Simulink.....	80
Figura 47 Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC, variación	80
Figura 48 HMI SCADA implementado experimentalmente en entorno Typhoon HIL	82
Figura 49 Acondicionamiento de señales para comunicación	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Características de tarjeta DSP</i>	64
Tabla 2 <i>Pines Digitales/ePWMs</i>	65
Tabla 3 <i>Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga</i>	74
Tabla 4 <i>Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga</i>	76
Tabla 5 <i>Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga</i>	79
Tabla 6 <i>Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga</i>	81

Resumen

En la actualidad la demanda de energía está alcanzando niveles más elevados que en los últimos treinta años, y con proyecciones a otros treinta años de superar el doble de demanda actual, además las tendencias apuntan a que el requerimiento de energía a nivel mundial se está expandiendo hacia las regiones geográficas menos pobladas, es decir que la convergencia de la demanda de energía y una mejor calidad de vida se dan de forma más concisa en los alrededores de las grandes ciudades, y las regiones con alto nivel de ruralidad, como lo es la distribución geopolítica de Latinoamérica, esto incluye desde luego a nuestro País Ecuador. Una forma sustentable de energía es aquella basada en energías renovables que son amigables con el medio ambiente, existen zonas geográficas favorecidas con recursos naturales en donde la energía proveniente de estos recursos puede ser almacenada y entregada el horario punta. Es así como los sistemas de almacenamiento basados en batería se han convertido en la mejor alternativa, por lo tanto, su control, gestión y cuidado son de importancia, en ese contexto en este trabajo de Integración Curricular se diseña e implementa un control bidireccional en dos modos de operación carga y descarga. El controlador es simulado e implementado en el sistema Typhoon HIL, el controlador se implementa en una DSP que permite la operación en tiempo real, la ventaja de usar este tipo de equipamiento es que opera en tiempo real y las pruebas preliminares que se realizan son reales incluso este es proceso previo a la industrialización de un producto tecnológico. El controlador propuesto está basado en estrategias PI y controles en cascada considerando mediciones de voltaje y corriente, que al ser implementado y aplicado a interfaces de electrónica de potencia son capaces de actuar inmediatamente, se realizan pruebas para distintos escenarios de almacenamiento de la batería, así como también a cambios de demanda eléctrica demostrando la correcta operación del control al cumplir el balance de potencia.

Palabras Clave: Convertidor Buck-Boost, Batería, Typhoon HIL, Simulink.

Abstract

Currently the energy demand is reaching higher levels than in the last thirty years, and with projections for another thirty years to exceed twice the current demand, in addition trends indicate that the energy requirement worldwide is expanding towards less populated geographical regions, i.e. the convergence of energy demand and a better quality of life occur more concisely in the surroundings of large cities, and regions with a high level of rurality, as is the geopolitical distribution of Latin America, this includes of course our country Ecuador. A sustainable form of energy is that based on renewable energies that are environmentally friendly, there are geographical areas favored with natural resources where the energy from these resources can be stored and delivered during peak hours. Thus, battery-based storage systems have become the best alternative, therefore, their control, management and care are of importance, in that context in this work of Curricular Integration a bidirectional control is designed and implemented in two modes of operation, charging and discharging. The controller is simulated and implemented in the Typhoon HIL system, the controller is implemented in a DSP that allows real-time operation, the advantage of using this type of equipment is that it operates in real time and the preliminary tests that are performed are real even this is a process prior to the industrialization of a technological product. The proposed controller is based on PI strategies and cascade controls considering voltage and current measurements, which when implemented and applied to power electronics interfaces are able to act immediately, tests are performed for different scenarios of battery storage, as well as changes in electrical demand demonstrating the correct operation of the control to meet the power balance.

Keywords: Buck-Boost Converter, Battery, Typhoon HIL, Simulink.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

La demanda energética ha venido sufriendo grandes aumentos en los últimos cincuenta años, y mucho más aun en los últimos treinta años, debido a los avances tecnológicos, junto con dispositivos cada vez más accesibles, por personas incluso en zonas geográficas de difícil acceso (Spitalnik, 2004)

La implementación de fuentes de generación de energía eléctrica no convencional, dentro de las microrredes como base de estas energías renovables ya que sus características de operación de manera autónoma y descentralizada, con el objetivo de suministrar potencia a la carga de una manera económica, por lo general esta Microred se compone por una parte generadora como, panel fotovoltaico, eólico, generador diésel, entre otros y una parte de almacenamiento como las celdas o las baterías (Deluque Pinto, 2022)

Las tecnologías actuales en cuanto a paneles fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento están ligadas de tal forma que, la evolución de uno tiene impacto en la evolución del otro, mientras el panel proporciona la energía, los acumuladores de esta permiten disponer de la potencia requerida por la carga incluso cuando la generación no esté ocurriendo, la construcción y características de estos dispositivos (Baterías) también depende de los materiales y el desarrollo de nuevas tecnologías (Santillan Tituaña, 2016)

Las baterías son las unidades de almacenamiento de energía más utilizadas, que convierten la energía química en energía eléctrica. Así, las baterías generan corriente continua y de esta manera, sirven para alimentar distintos circuitos eléctricos, dependiendo de su tamaño y potencia la batería suministrará dicha potencia con la finalidad de mantener un flujo de energía constante hacia las cargas. Las aplicaciones de las baterías son múltiples, es así como en este trabajo se estudiarán sistemas de almacenamiento de fuentes de energía renovables para

operaciones de respaldo en aplicaciones de energía. Si bien se dispone de distintos tipos de materiales para una correcta operación, requieren de controles apropiados que permitan una operación y desempeño eficiente, el ejemplo más apropiado para este tipo de control es el implementado dentro de una Microred, la cual está aislada, y las baterías proporcionan estabilidad, con su operación de carga y descarga, permitiendo también el abastecimiento continuo de energía hacia la demanda, dependiendo también de una adecuada gestión, que permita una adecuada operación y la preservación de las mismas.

Para la utilización de esta energía generada y almacenada, es necesario el uso de convertidores de tipo electrónico, basados en switches que permiten convertir una entrada DC no regulada en una salida DC regulada, aplicados en gran magnitud en la actualidad. (Sanhueza Hormazábal, 2014)

El constante avance de la tecnología respecto a la electrónica de potencia, así como las nuevas técnicas de desarrollo y construcción de dispositivos basados en semiconductores, hace posible la implementación de Convertidores estáticos, tanto de enlace directo como indirecto, a sistemas de generación y almacenamiento aislados más conocidos como Microrredes (Ballester Eduard, 2011) Así mismo, la constante evolución de los microprocesadores base de los controladores de sistemas como el presentado en este estudio, hacen posible la realización de controladores para un sistema de almacenamiento de manera bidireccional. En este trabajo se usan controladores tradicionales como un controlador de tipo PI (Proporcional-Integral) tratando durante el desarrollo del diseño en obtener un control óptimo, lo cual depende de forma directa de las ganancias K_p y K_i de los respectivos controladores (Ogata, 1996)

En este proyecto en particular el controlador de tipo PI de corriente realiza controles independientes de tipo PI's para cada switch de estado sólido (IGBT), luego los controladores independientes de tipo PI son los encargados de realizar la carga y descarga respectivamente, para después colocar un selector que hace las veces de disponibilidad de energía

seleccionando así la carga o descarga de la Batería, por último, otro Switch para aumentar o quitar carga en paralelo al bus de salida DC. El control local de las baterías se encarga de mantener regulado los niveles de generación y evitar las desviaciones de los parámetros básicos en los terminales de los convertidores de potencia. el tiempo de respuesta del controlador debe ser rápido debido a que actúa de manera local, y los cambios de demanda requieren un despacho energía en tiempo real. El trabajo propuesto tiene el siguiente aporte respecto a los antecedentes mencionados en párrafos anteriores:

El proyecto de investigación completo consiste en diseñar simular e implementar estrategias de control tradicionales para una batería conectada a una carga a su vez este sistema está conectado a una fuente de generación DC constante, junto con el switch de demanda este generador es utilizado para la realización de la carga de la batería de manera aislada. Esta estrategia debe permitir un buen desempeño del sistema aprovechando al máximo las características físicas y químicas de la batería, así como el alargamiento de su vida útil.

Este trabajo propone el diseño e implementación de un controlador Bidireccional para el convertidor Buck-Boost DC/DC con el fin de alimentar cargas de manera local de tipo resistivas de potencia constante, la propuesta de tesis tiene alta aplicabilidad porque puede ser usado para el control primario de sistemas de gestión energético de micro redes aisladas, cuyos componentes dispongan de un sistema de almacenamiento compuesto por baterías conectadas en paralelo para suministrar potencia a un bus de carga cuando la generación esté detenida.

Para la ejecución del proyecto se realiza las siguientes etapas: i) Simulación de la interface de electrónica de potencia del converso DC/DC conectado a una carga resistiva, ii) Diseño y simulación de un controlador para el conversor DC/DC de manera Bidireccional, iii) Diseño y simulación de un control para el inversor DC/DC bidireccional en el sistema Typhoon HIL, iii) Validación y comparación del desempeño del controlador para diferentes valores de

carga por simulación, iv) Implementación de la planta y los convertidores en el sistema Typhoon HIL, v) Implementación del control DC/DC Bidireccionales un sistema DSP, vi) Validación y comparación de los controladores y las topologías del sistema usados.

Planteamiento del problema y justificación

En aplicaciones con energías renovables en donde se busca el abastecimiento de cargas aisladas o locales como por ejemplo abastecer la demanda eléctrica de un hogar con energía limpia, se presentan escenarios donde el recurso renovable y la demanda ya fue satisfecha y presenta energía limpia sobrante, entonces el recurso restante es desperdiciado o se disipa en forma de calor, cuando esta energía puede ser almacenada para luego ser utilizada en instantes donde los recursos naturales son escasos, así se puede garantizar un abastecimiento de energía limpia y de bajo costo durante todo el día, para lograr esto se requiere de una operación eficiente de la batería a través de las estrategias de control que permitan un almacenamiento eficiente de la energía.

Algunos de los factores que intervienen en la generación de energías renovables sustentables, están relacionados con el cambio climático, factores como, excesos de lluvias, o inestabilidad de vientos, cambios inesperados de estación o microclimas, entre otros, estos factores son los que en gran medida son responsables de los cambios que experimentan sectores geográficos donde hace cincuenta años se podía generar curvas de radiación y por ende picos de almacenamiento estables dentro de la Microred aislada, ahora esos parámetros son altamente inciertos o poseen un grado de incertidumbre muy alto, es decir, como la incertidumbre de que una micro red no funcione al cien por ciento como debería, los sistemas de almacenamiento deben ser o presentar mayor robustez en cuanto a su entrega de energía hacia las cargas, así como su control al momento de recibir energía para su carga tomando en cuenta la preservación de la integridad y la vida útil de las mismas.

Los recursos renovables por naturaleza son variables, una opción para reducir esta

intermitencia y garantizar estabilidad al sistema se usara sistemas de almacenamiento como baterías siempre cuando estas operen eficientemente y eso se logra con técnicas de control adecuadas.

La principal problemática que presenta las baterías desde un enfoque de control es que requieren trabajar en dos modos de operación es decir carga y descarga, por lo que se requiere de interfaces de electrónica de potencia y controladores que permitan este modo de operación. Por otro lado, la mala operación de una batería puede llevar a que su vida útil sea corta y a reposiciones constantes, por lo tanto, es necesario incrementar su vida útil y eso se puede lograr operando las baterías eficientemente evitando que lleguen a descargas profundas y escenarios de sobrecarga lo que se puede lograr con propuestas de técnicas de control que permitan considerar estados de carga y descarga.

Finalmente, para obtener resultados reales se requiere de equipamiento que emule el funcionamiento real de las baterías, que se validen propuestas simuladas también de forma experimental, en ese contexto actualmente existen equipos para aplicaciones de energía específicamente para electrónica de potencia que emulen unidades de generación, que es donde se validaran los controles.

Hoy en día las energías renovables han tomado mucha importancia, debido a que son más amigables con el medio ambiente, y además se trata de aprovechar al máximo los recursos naturales sin consecuencias desfavorables para con los mismos. Dentro de esta línea de investigación que también abarca las micro redes como una forma de contribuir a la descontaminación del planeta, en cuanto a generación de energías se refiere y uno de los componentes más importante son los sistemas de almacenamiento.

Un sistema de almacenamiento de energía generada por estas microrredes es necesario para un mejor aprovechamiento y distribución de dicha energía, es por eso por lo que es necesario la utilización de técnicas de control, algunas de las cuales han sido ampliamente estudiadas, para lograr resultados positivos y aplicables en diferentes sistemas. El objetivo es

aprovechar de manera más efectiva los recursos de la planta y evitar la pérdida innecesaria de energía. Estas técnicas son innovadoras y pueden ser muy beneficiosas para mejorar el rendimiento de la planta.

Un controlador cualquiera que sea su tipo debe estar enfocado en este caso específico, a la velocidad de conmutación del bloque al cual va a estar dirigido, es decir el controlador del convertidor bidireccional DC/DC debe soportar una frecuencia muy alta de conmutación. Este trabajo está dirigido específicamente a este tipo de controlador.

Resolver problemas relacionados al aprovechamiento del recurso natural a través del almacenamiento de energía se puede lograr con aplicaciones orientadas al control bidireccional de las baterías, el estudiante de la carrera de Electrónica y Automatización posee los conocimientos para la ejecución de este tipo de proyectos las asignaturas más relevantes que se aplican son: circuitos eléctricos, electrónica, sistemas de control, electrónica de potencia, control digital, y control inteligente.

El alcance de este trabajo implica: el modelamiento del sistema de almacenamiento, baterías, diseño de una estrategia de control que le permita a la batería operar de modo bidireccional, esta estrategia de control se validará por simulación y de forma experimental en el sistema Typhoon HIL, las cargas a usar son resistivas, no se considera la conexión a la red trifásica.

Objetivos

Objetivo general

Controlar Bidireccionalmente una Batería implementado en el Sistema Typhoon HIL

Objetivos específicos

Diseñar un simulador de un sistema de almacenamiento basado en batería

Realizar experimentos en lazo abierto del sistema

Implementación del sistema de almacenamiento y la interfaz de electrónica de potencia en la unidad Typhoon HIL.

Diseñar un algoritmo de control bidireccional de carga y descarga de la batería.

Validar por simulación.

Implementar experimentalmente una Estrategia de Control Local Bidireccional de una Batería en Typhoon HIL y DSP.

Hipótesis

¿El diseño e implementación de un control Bidireccional para el conversor Buck-Boost DC/DC para una Batería permite la operación adecuada al alimentar una carga?

Capítulo II

Fundamento Teórico

En este capítulo se describe los fundamentos teóricos y conceptos utilizados para el desarrollo de esta tesis, consideran investigaciones y publicaciones más relevantes en la literatura y de autores expertos en el tema de controladores bidireccionales.

Batería

Una batería de acumuladores es una fuente de tensión continua y constante y considerada también una fuente reversible de corriente, que se comporta como receptor de corriente durante su carga y como generador de corriente durante su descarga, dentro de ella, la energía se almacena en forma química y la convierte en energía eléctrica cuando se requiere, gracias a sus diferentes estructuras físicas son también una fuente de energía portátil y conveniente que se usa en un sin número de aplicaciones.

La energía eléctrica es un recurso imprescindible al cual se le da diferentes aplicaciones, como la transformación en otros tipos de energía como energía térmica, energía mecánica entre otras, una problemática es su almacenamiento es por ello por lo que existe un sin número de métodos para resolver esta situación, entre los cuales el más ideal y utilizado hoy en día, es el uso de baterías gracias a su portabilidad, disponibilidad comercial en el mercado, comparativamente económico. Consiste en la transformación de energía eléctrica en energía química y viceversa. (Gonzalez Santacruz, 2015)

Clasificación de las baterías

En la actualidad existen dos tipos de baterías, las baterías primarias (no recargables) están diseñadas para funcionar durante un periodo y luego ser desechadas, estas pueden volver a funcionar solo si se reemplaza el químico del que se encuentran compuesta. Las baterías secundarias (recargables) están en la posibilidad de volver a reutilizarse varias veces, esto influye directamente en el estado de salud de esta (SOH), al ser expuestas al paso de

corriente durante un tiempo de forma contraria a la que fluye la corriente de la batería. (Peña Ordoñez, 2011)

Características y componentes de las baterías

Las baterías a través del tiempo han venido evolucionadas de tal manera que, los términos que se usan hoy en día están ligados hacia una estandarización de los dispositivos de almacenamiento de energía. (Peña Ordoñez, 2011)

Una batería básicamente se compone por:

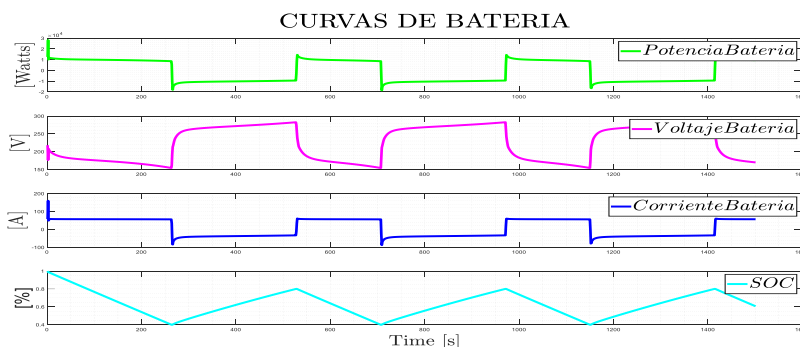
- Celda, elemento que forma la batería, el cual puede estar conectado en serie o paralelo para la obtención de un voltaje o corriente deseado.
- Estado de carga (SOC) %, indica el estado de carga de la batería en forma porcentual con relación a su capacidad máxima.
- Capacidad, es la proporción medida en amperios-hora (Ah) que puede entregar o recibir la batería.
- Capacidad nominal, cantidad que puede proporcionar una batería desde su carga máxima hasta una tensión en descarga específica, con una temperatura ambiente y una razón de descarga específica.
- Máxima corriente de descarga continua depende de la capacidad y la tasa de descarga máxima, siendo la corriente máxima que puede descargar de forma continua.
- Autodescarga, es la pérdida de capacidad gradualmente de un batería, aunque no se la esté utilizando, se expresa en porcentaje.
- Sobrecarga, proceso que tiene lugar cuando se ha expedido la capacidad de almacenamiento máxima de una batería.
- Densidad de Energía, Energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/l)

- Densidad de Potencia, Potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen (W/l)
- Energía Específica, Energía que puede almacenar una batería por unidad de peso (Wh/kg)
- Potencia Específica, Potencia que puede entregar una batería por unidad de peso (W/kg)
- Vida útil, periodo por el cual la batería puede mantener sus características óptimas y funcionalidades normales.
- Eficacia (%), es la proporción de energía útil que entrega la batería y la energía total que se ha entregado a la batería durante la carga.
- Tiempo de recarga norma través del tiempo han, Es el tiempo necesario para recargar completamente la batería
- Curvas de carga y descarga, Gráfica utilizada para definir el funcionamiento y prestaciones de una batería.

En la **Figura 1**. Se puede observar las curvas características de una batería estándar, la figura muestra curvas de Potencia, voltaje, Corriente y el estado de la batería (SOC)

Figura 1

Curvas características de una batería



Nota. La figura 1 representa las curvas características de una batería de Ion Litio de 200 voltios voltaje nominal.

Baterías de Plomo-Acido

Las baterías de plomo ácido son un tipo de baterías desechables, las cuales están constituidas por celdas, hoy en día es la tecnología de almacenamiento de energías más primitivo al mismo tiempo es un medio de almacenamiento electroquímico más habituado en pequeños sistemas de respaldo. (Padrón Jabib, 2013)

Ventajas: Las baterías de plomo ácido entre sus ventajas presentan el tener un bajo costo de adquisición además de soportar un uso constante. La reacción química de reducción oxidación producidas en el transcurso de operación de la batería producen un deterioro de los electrodos por lo tanto reduce la vida útil y el número etapas de lapsos de carga máxima, igualmente esto depende de la densidad de descarga. Así mismo otro factor a considerar es la temperatura la cual tiene un efecto sobre la capacidad de almacenamiento y vida útil de la batería. (Gonzalez Santacruz, 2015)

Desventajas: entre una de las desventajas tenemos un mantenimiento más continuo, ya que demandan una supervisión y restitución de los niveles de agua en el electrolito, igualmente dichos sistemas manifiestan ciclos frecuentes de carga y estados parciales de carga es por este motivo que puede presentarse la irreversible polarización de los electrodos, en tal sentido reduce la capacidad de carga e incrementa la posibilidad de causar una avería en el suministro. Si se llegara a presentar una avería en la capacidad de carga de una sola batería, como resultado afecta al rendimiento en general del banco de baterías. (Gonzalez Santacruz, 2015)

Baterías de Níquel-Cadmio

La solución alcalina KOH (hidróxido de potasio) actúa como electrolito. Los dos electrodos se encuentran aislado por un separador, y son enrollados en forma de espiral dentro del armazón, dicho diseño produce una reducción de la resistencia interna por el hecho de haber un mayor número de electrodos en unión con el material activo en cada celda. Este ejemplar de batería puede hallarse en dos configuraciones, dependiendo de la aplicación: 1)

forma sellada para dispositivos portátiles; 2) tipo húmedo para fines industriales. (Gonzalez Santacruz, 2015)

Ventajas: este tipo de baterías demandan un mantenimiento con menor regularidad, además de poder proporcionar mayor corriente en un periodo menor, al mismo tiempo su autonomía de mayor si se la compara con las baterías de Pb ácido. Es necesario resaltar su capacidad para sustentar ciclos de descarga por periodos más largos. Presentan una mayor robustez en proveer una tensión invariable durante los ciclos de carga y descarga intensos.

Por último, presentan una resistencia interna muy baja debido a esto las hace ideales para disponer conexiones en serie. (Gonzalez Santacruz, 2015)

Desventaja: la desventaja a considerar es su alto costo económico, pudiendo optar por un sistema de Pb ácido el cual sería una décima parte del costo de un sistema Ni-Cd, el alto costo es producto de un refinado proceso de fabricación elemental y la poca disponibilidad de los materiales necesarios. No menos importante otra desventaja de las baterías de Ni-Cd es la alta toxicidad del elemento cadmio es por ello su dificultad al momento de realizar un remplazo. (Gonzalez Santacruz, 2015)

Baterías de Litio

En los años 70 Axxon creo la primera batería de litio recargable, basada en un cátodo de di-sulfuro de titanio y un ánodo aluminio, las celdas no se diferencian físicamente mucho con respecto a las otras tecnologías de celdas. Estas celdas son una composición de dos capas de electronos y una capa de electrolito el cual depende del tipo de batería en medio de ambas, se encuentran separadas por una capa de un material poroso de polietileno o polipropileno, el electrodo positivo este compuesto de óxido de cobalto o de fosfato de hierro y litio. El electrodo negativo este hecho de carbón(grafito). (Padrón Jabib, 2013)

Interruptor de estado solido

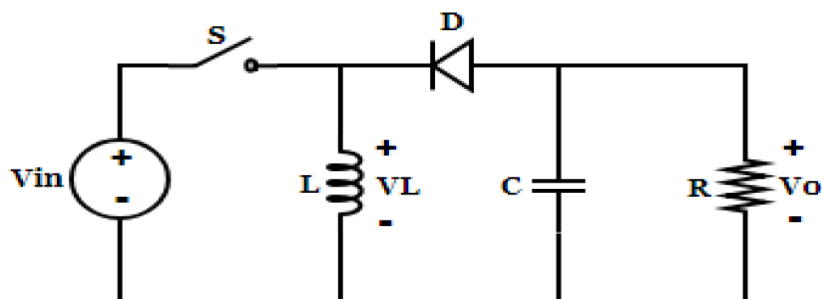
Es un dispositivo compuesto de un semiconductor, que permite el paso de corriente o conducción siempre y cuando exista una señal en su pin de control, así mismo se abre o no permite la conducción cuando la señal de control está en niveles bajos o su programación así lo indique, todos los interruptores de estado sólido funcionan a una frecuencia de conmutación bastante elevadas, y cuya modulación o señal portadora es el PWM. (Ballester Eduard, 2011)

Conversor Buck-Boost

Un conversor Buck-Boost también conocido como conversor reductor(buck) elevador(boost), conversor inductor capacitor, es un conversor el cual permite tener a la salida una gamma de voltajes estables, los cuales pueden ser mayores o menores que su voltaje de entrada, independientemente que su entrada sea variable. En la **Figura 2** se puede observar el esquema del circuito mencionado. (Rivera Yepes, 2018)

Figura 2

Conversor Buck-Boost básico



Nota. Representación esquemática circuito Buck-Boost. Tomado de (Rivera Yepes, 2018)

Relaciones entre la tensión y la corriente

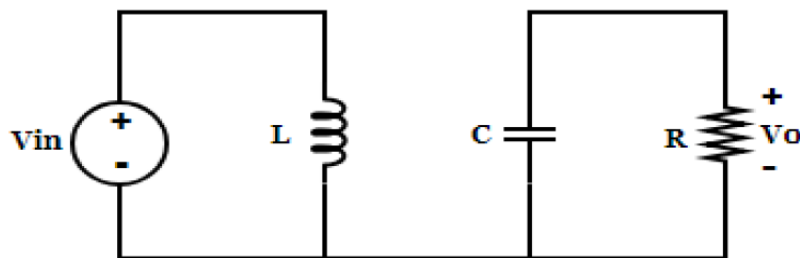
- El circuito trabaja en régimen permanente lo que quiere decir que todas las variables (corriente, tensión) del circuito han llegado a un valor constante y constante.
- La corriente en la bobina i_L es permanente
- El condensador tiene las condiciones adecuadas como para proporcionar a la salida una tensión constante

- El tiempo por el cual se encuentra cerrado el interruptor se denomina DT , el tiempo por el cual se encuentra abierto es $(1 - D)T$
- Se considera los componentes como ideales

El siguiente circuito representado por la **Figura 3** en este circuito el interruptor se ha cerrado, el diodo equivale a un circuito abierto ya que esta polarizado inversamente, el voltaje en la bobina es $v_L = V_{in}$ (Rivera Yepes, 2018)

Figura 3

Equivalente del circuito cuando el interruptor está cerrado



Nota. Representación del circuito del convertidor Buck-Boost cuando el interruptor se cierra.

Tomado de (Rivera Yepes, 2018)

Análisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor se encuentra cerrado, el diodo deja de conducir y se abre, por lo tanto, el voltaje en la bobina es igual al voltaje de entrada como se define en la ecuación (1)

$$v_L = V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L}$$

La variación de la corriente en la bobina es constante, es por ello por lo que la corriente aumenta linealmente, y se expresa como se observa en la ecuación (2)

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2)$$

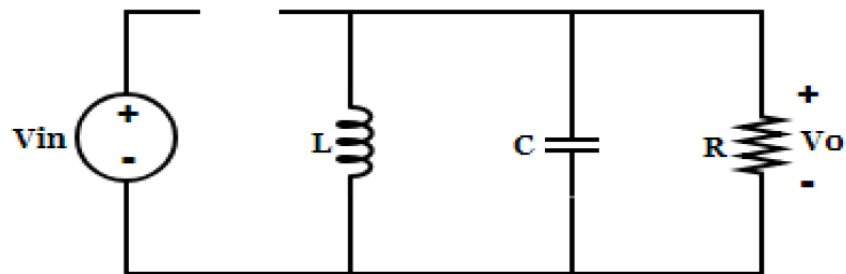
Despejando la variación de la corriente con el interruptor cerrado da como resultado la ecuación (3) que representa la tasa de corriente que pasa por la bobina cada vez que este se cierra.

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_{in}DT}{L} \quad (3)$$

En el siguiente esquema del circuito del convertidor, se observa como toma una configuración como muestra la **Figura 4**, cuando el interruptor de estado sólido está abierto, el diodo equivale a un interruptor cerrado, porque está polarizado directamente, y el voltaje en la bobina es igual al voltaje de salida del convertidor es igual a $V_L = V_o$ (Rivera Yepes, 2018)

Figura 4

Equivalente del circuito cuando el interruptor está abierto



Nota. Representación del convertidor Buck-Boost cuando el interruptor de estado sólido está abierto. Tomado de (Rivera Yepes, 2018)

Análisis con el interruptor abierto

Cuando el interruptor se encuentra abierto, el diodo se polariza y conduce, haciendo que pase corriente por la resistencia y condensador, la tensión en la bobina se representa en la ecuación (4)

$$v_L = V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{V_0}{L} = \frac{di_L}{dt}$$

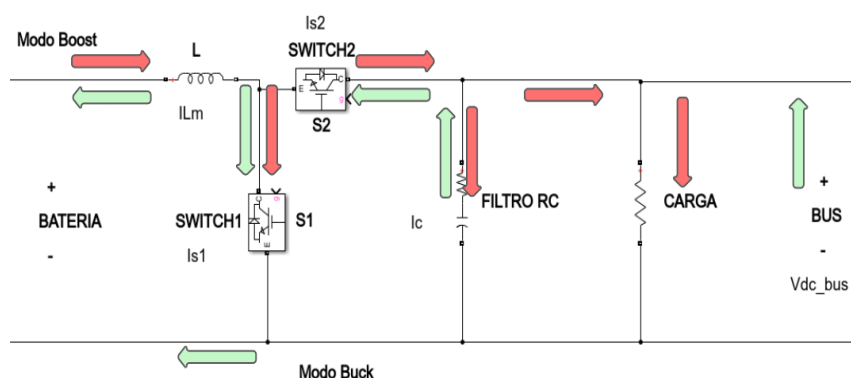
La tasa de variación de corriente en la bobina es constante y está definida como el voltaje de entrada versus el valor del inductor como se representa en la ecuación (5)

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (5)$$

De igual forma despejamos la variación de la corriente con el interruptor cerrado, y obtenemos la tasa de cambio de la corriente a través de la bobina, en cada instante que el interruptor está cerrado como se ve en la ecuación (6).

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_{in}(1-D)T}{L} \quad (6)$$

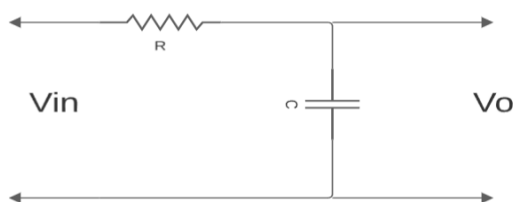
La implementación para este trabajo exige una configuración como la mostrada en la **Figura 5**, representa un conversor Buck-Boost Bidireccional, es decir su topología no es la de un conversor Buck-Boost básico, la principal característica de este tipo de conversor es que, utiliza dos interruptores de estado sólido o IGBT's, y la principal diferencia con el conversor básico **Figura 2** es que, este trabaja de forma bidireccional, de manera constante, es decir que no necesita de un cambio en la frecuencia de trabajo de los interruptores, para cambiar de modo de conversión (Boost o elevador y Buck o reductor), solo requiere de la señal de salida del controlado modulada con el PWM respectivo, además esta señal debe ser una directa para un interruptor y la complementaria de esta para el otro interruptor, asegurándose así que los dos IGBT's no conmuten al mismo tiempo.

Figura 5**Convertor Bidireccional Buck-Boost de IGBT's**

Nota. Representación del convertor Buck-Boost Bidireccional con interruptores de estado sólido de conmutación rápida IGBT's

Filtro RC salida del Convertor Buck-Boost

El filtro RC pasivo es uno de los filtros más comunes utilizados en los convertidores, como muestra la **Figura 6**, la configuración por la cual se ha optado es la del filtro RC pasa bajos con el objetivo del paso de frecuencias más bajas y rechazando las frecuencias altas, en paralelo la eficiencia está gobernado por los valores de resistencia y el valor del condensador, al igual del tipo de señal que se esté filtrando, así pues, los filtros RC son mayormente utilizados para manipular señales eléctricas (Chipuel Perez, 2016)

Figura 6**Filtro RC**

Nota. El filtro RC se usa a la salida del convertor DC/DC con la finalidad de recortar pequeños picos de corriente y voltaje que puedan afectar en un instante muy pequeños cuando de conectan cargas al bus.

Entorno Typhoon HIL

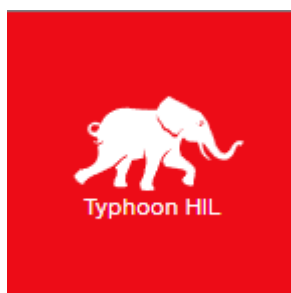
Typhoon HIL es una solución de automatización de nivel industrial, que permite hacer evaluaciones de entornos de programación, diseño, y sistemas de supervisión, de procesos industriales que representen plantas donde la electrónica de potencia sea un requerimiento básico de las mismas, entonces Typhoon HIL, permite simular sistemas de control mediante el sistema Hardware In the Loop, es decir realizar el análisis, supervisión, y corrección de errores en modelos de plantas industriales o controladores, antes de ponerlos en marcha en la vida real, y esta potenciado para la electrónica de potencia.

Funcionalidades de Typhoon HIL

Typhoon HIL Inc. es el líder del mercado y de la tecnología en el campo de rápido crecimiento de la simulación de controlador-hardware-en-la-banda (C-HIL) de alta fidelidad para la electrónica de potencia, las microrredes y las redes de distribución. Proporcionamos soluciones de prueba verticalmente integradas y probadas en la industria, junto con la más alta calidad de soporte al cliente. La empresa se fundó en 2008 y, desde entonces, ha creado productos que se distinguen por la máxima facilidad de uso, un rendimiento inigualable, tecnología punta y asequibilidad. Su logo se muestra en la **Figura 7** (HIL, 2023)

Figura 7

Typhoon HIL Solutions



Nota. Símbolo representativo de Typhoon HIL Solution, empresa desarrolladora de hardware y software, orientado a sistemas Hardware In the Loop. Tomado de (HIL, 2023)

Interfaz gráfica de software Typhoon HIL

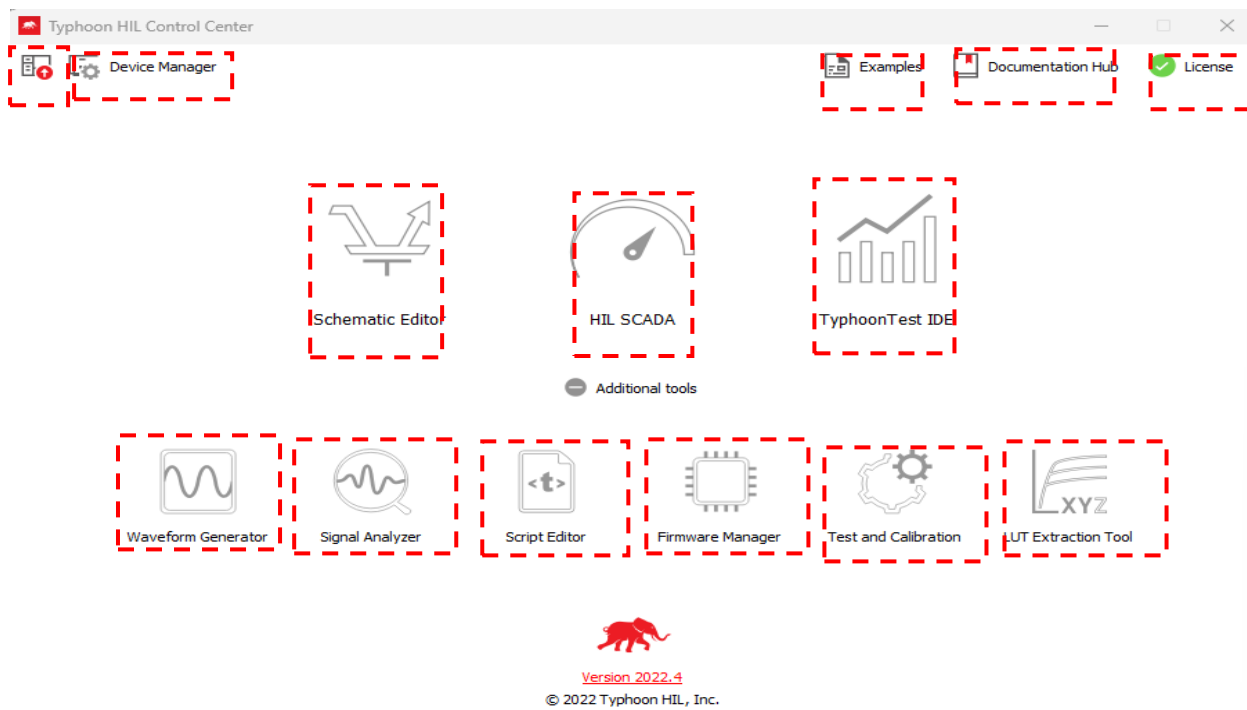
La **Figura 8** muestra la interfaz de usuario principal del software Typhoon HIL, donde se encuentran varios iconos que representan los diferentes programas integrados a los que se pueden acceder, dentro de esta plataforma, los diferentes accesos que tenemos; los principales, de izquierda a derecha de arriba abajo.

- Editor esquemático, donde se programa gráficamente los esquemas de los circuitos electrónicos, modelos de plantas, controladores, y subsistemas de software como Python.
- HIL Scada, aquí se desarrollan sistemas de supervisión como HMI o sistemas Scada de manera propietaria es decir todos los tags usados en el Editor esquemático están por defecto en este software, sin la necesidad de un OPC externo y sin límites de tiempo.
- Typhoon Tex IDE, el cual se encarga de brindar informes acerca del esquemático que se programó y está corriendo dentro del sistema Typhoon y supervisado por HIL Scada, este apartado solo funciona cuando se tiene conectado un equipo Typhoon externo.
- Un Generador de Ondas, similar a un generador de la vida real, ya que cuenta con un selector de tipo de onda, frecuencias, amplitudes, PWM externo al generador, y potenciado para generación de energía para paneles solares.
- Analizador de señales, un osciloscopio customizado donde se analizan las señales provenientes del Scada.
- Editor de Programación Script Editor, un entorno de programación en Python
- Firmware Manager, una interfaz que permite la visualización de los Firmwares de los equipos físicos Typhoon, y que permite las actualizaciones de estos cada vez que se requiere y siempre y cuando la licencia de usuario así lo permita.
- Calibrador de equipos físicos Typhoon HIL, permite lanzar una prueba o test para calibrar los equipos que estén conectados al PC host donde se esté ejecutando el programa.

- LUT Extraction Tool, este apartado recibe los parámetros desde el Scada y devuelve gráficos de tipo estadísticos para análisis profundos en cuanto a niveles de gestión.
- Además de los iconos antes explicados la interfaz principal del software typhoon HIL muestra accesos en la parte superior derecha a Ejemplos, Documentación Propietaria del programa, y el área de verificación o cambios de licencia. Finalmente, en la parte superior izquierda, muestra los accesos a; Información del software y un gestor de dispositivos conectados el cual se detalla en la **Figura 9**

Figura 8

Interfaz de usuario Typhoon HIL



Nota. Interfaz de usuario de Typhoon HIL Control Center, principales componentes, accesos, y pestañas del software. Tomado de (HIL, 2023)

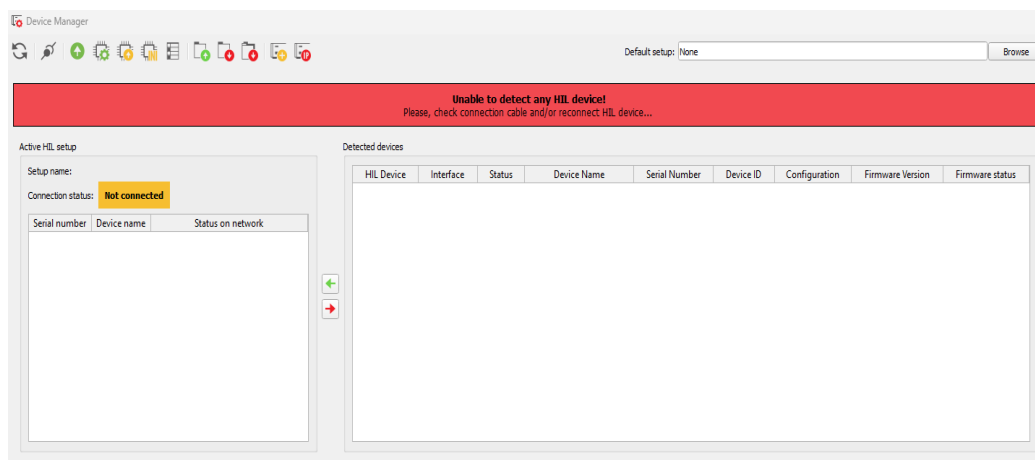
Gestor de dispositivos

En la **Figura 9** se muestra la ventana de gestor de dispositivos físicos que están conectados al PC host que esté conectado al sistema Typhoon HIL, si esta interfaz detecta que un dispositivo físico HIL está conectado al software, mostrará el nombre del dispositivo, así

como el código de serie y si su firmware está actualizado, así mismo mostrará si existe algún problema con los dispositivos conectados.

Figura 9

Gestor de dispositivos Typhoon HIL



Nota. Además de mostrar los dispositivos conectados, verificaciones de conexión o problemas de conexión este también muestra si el dispositivo adquirido es compatible con la licencia.

Tomado de (HIL, 2023)

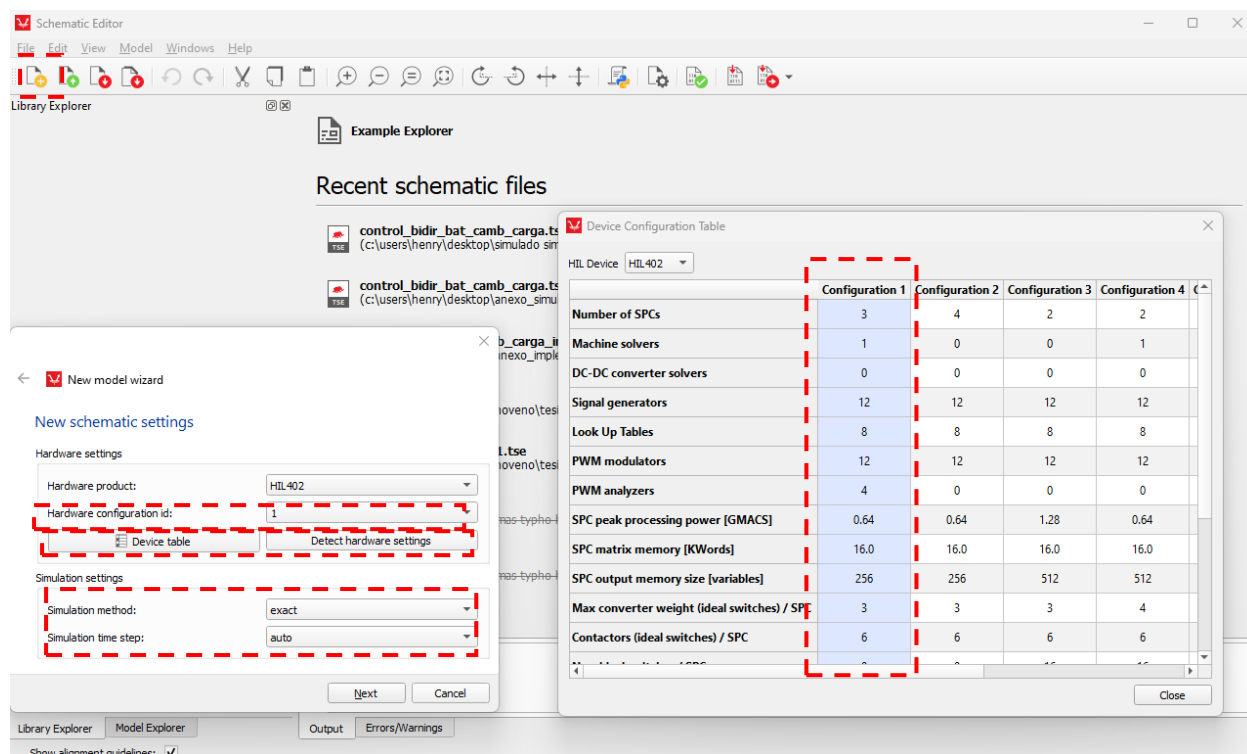
Editor esquemático

El editor de diagramas esquemáticos brinda una visualización de la ventana mostrada en la **Figura 10**, donde se puede crear un nuevo esquemático y también dar la ruta donde los programas creados se van a guardar, una vez creado un nuevo programa, se lanza la ventana más pequeña donde se configura los espacios de memoria que se requieren para la optimización del software, es decir si el esquemático tiene varios componentes y conexiones además de la distribución de pines necesarios tanto para la simulación o para la implementación, esta ventana permite seleccionar las mejores configuraciones respecto al hardware en el que se va a realizar la implementación del programa, toma en cuenta los requerimientos de recursos de hardware del PC host y los requerimientos de memoria RAM por parte del software Typhoon HIL, si el computador no tiene los requerimientos necesarios en la

parte de software el esquemático arrojará un error de espacio de memoria, y por parte de hardware el PC se volverá muy lento y no permitirá la carga de programas.

Figura 10

Editor Esquemático de Typhoon HIL



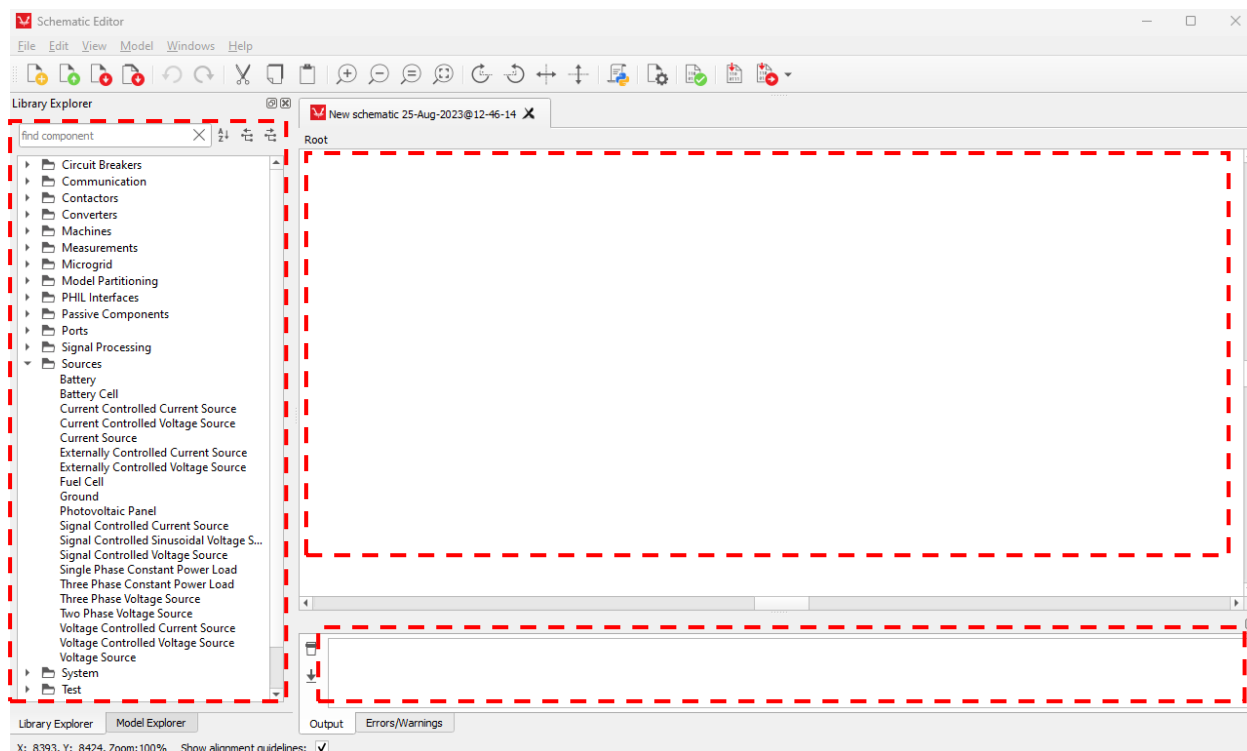
Nota. Además de configurar un nuevo esquemático también se puede abrir proyectos existentes y cambiar de ruta para nuevos proyectos. Tomado de (HIL, 2023)

Interfaz de trabajo

En la interfaz de trabajo del software Typhoon HIL, como se ve en la **Figura 11** se consideran las tres partes principales, como sol el apartado de biótica de componentes y elementos, así como circuitos realizados a nivel de microrredes, y elementos de conexión junto con sus protocolos compatibles con Typhoon HIL, luego tenemos el entorno de conexiones donde se arrastran los elementos y se realiza las diferentes configuraciones, circuito o plantas para simulación o implementación, y finalmente el apartado de muestra de errores o advertencias de conexión o de compatibilidad.

Figura 11

Interfaz de Typhoon HIL



Nota. Además de los apartados principales, la interfaz también muestra los botones de compilación de esquemático, y carga del esquemático al dispositivo HIL. Tomado de (HIL, 2023)

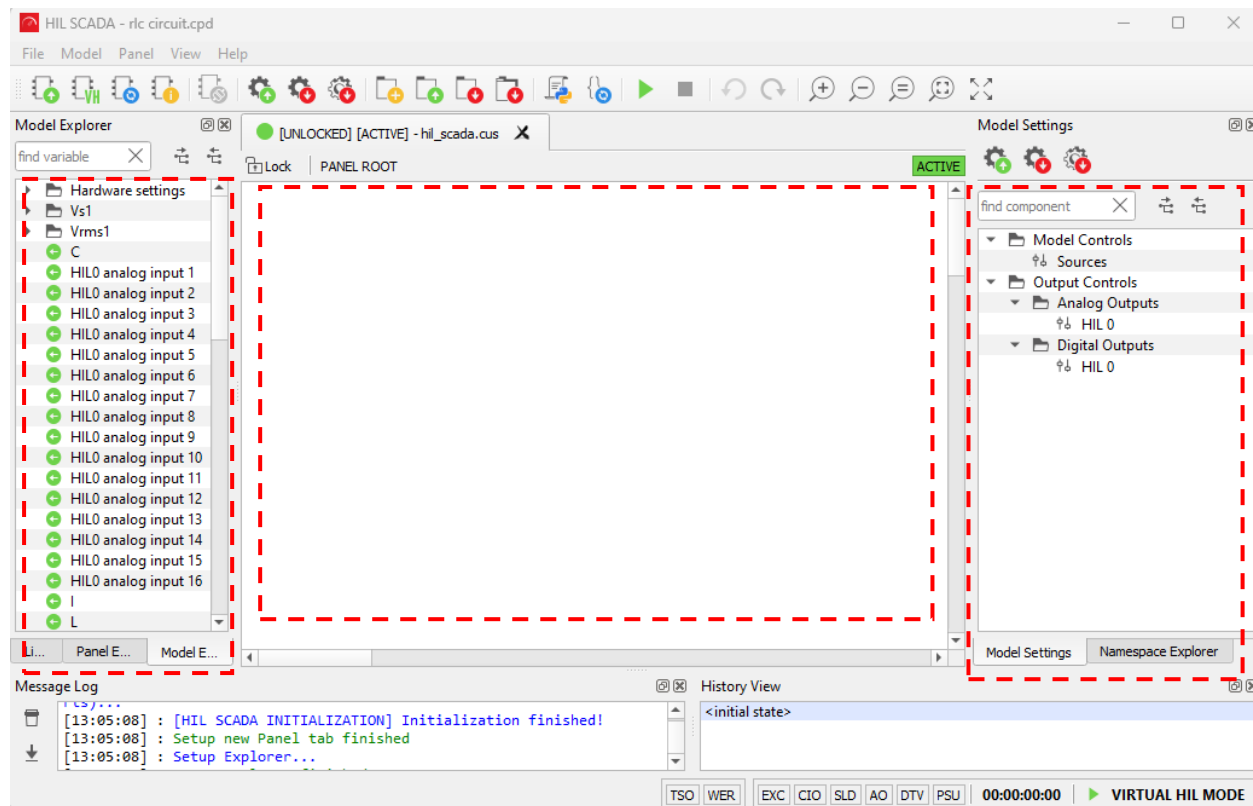
Interfaz de desarrollo SCADA

En esta ventana que se muestra en la **Figura 12**, se tienen los apartados de; las tags usadas en el diagrama esquemático, el propio software discrimina las señales entre analógicas y digitales, después está el entorno de trabajo donde se arrastran las tags y automáticamente configura el dispositivo que va acorde con la señal, y finalmente tenemos el apartado de configuración de señales, este apartado es exclusivo para trabajar con el dispositivo físico, y con el controlador ya cargado a la DSP, aquí se hace un escalamiento de señales para que sean leídos por el canal de comunicación con Simulink, una vez obtenido las escalas de las

mediciones que realiza el canal de comunicación estas señales pueden ser usadas para análisis o para desarrollo de controladores en el software Matlab-Simulink.

Figura 12

Interfaz de desarrollo de SCADA



Nota. Además de los apartados principales de la interfaz, esta también cuenta con botones para cargar un SCADA ya existente, y cambios de ruta para archivos nuevos. Tomado de (HIL, 2023)

Capítulo III

Diseño de un algoritmo de control bidireccional para baterías.

En este capítulo se describe la arquitectura del control usada para el desarrollo del control bidireccional para una batería, el cual será validado por simulación, posteriormente en el sistema Typhoon HIL, y finalmente validado experimentalmente y en tiempo real, porque la planta estará en el sistema HIL H402, y el controlador estará en una digital signal processor (DSP).

Para desarrollar un método de control para un convertidor bidireccional Buck-Boost DC/DC, lo primero es conocer la planta o proceso a controlar, con las señales de control se aplican al convertidor siendo este el elemento de control final, este presenta dos modos de operación que son carga y descarga.

Conversor bidireccional Buck-Boost DC/DC

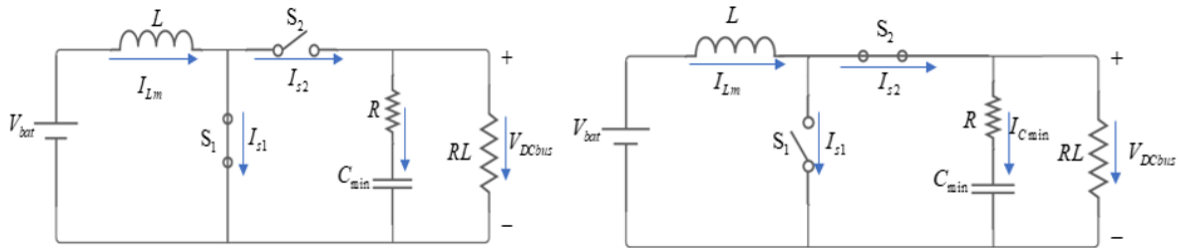
En este apartado se presenta el modelamiento del conversor bidireccional DC/DC para una batería, tomando como principio el comportamiento del conversor en ambos modos, Buck para la reducción de una tensión a la salida, con el fin de cargar la batería conectada después de la bobina, para este caso de derecha a izquierda, y Boost para la elevación del voltaje a la salida del filtro, para este caso de izquierda a derecha es decir modo descarga.

Modelamiento del convertidor en modo Boost

En este trabajo de investigación se controla un conversor bidireccional. En la **Figura 13** se muestra un conversor Buck Boost en operación Boost, diseñado como fuente principal el equivalente a un batería definido por (V_{bat}) , y el Bus DC es el voltaje (V_{DCbus}) en la carga LH . Mientras que S_1 y S_2 son controlados de acuerdo con el modo de operación. Cuando trabaja en modo Boost (elevador) de izquierda a derecha y se cierra s_1 mientras que s_2 está abierto a la carga no le llega corriente, mientras que cuando cambia de estado s_1 y s_2 en este caso la carga es alimentada operando la batería en modo carga ver **Figura 13**

Figura 13

Diagrama del Convertor en modo Boost (Elevador)



Nota. Cuando el convertor trabaja en modo Elevador o Boost, los interruptores no deben conmutar al mismo tiempo para evitar cortos en la bobina. Tomado de (Engineering, 2021)

Para el diseño de convertidor en modo Boost se requiere conocer de los valores de inductancia L y el valor del capacitor del filtro C_{\min} , para lo cual se define en ciclo de trabajo D en la ecuación (7), que se usa para la conmutación de S_1 , en donde $V_{bat} = V_s$ que representa el voltaje de la fuente hacia la izquierda del convertidos o voltaje de la batería, $V_o = V_{DCbus}$ es el voltaje a la salida del filtro.

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} \quad (7)$$

El valor del inductor L está definido por la ecuación (8), donde este valor debe ser mayor o igual al el ciclo de trabajo D multiplicado por la diferencia al cuadrado de uno menos el ciclo de trabajo, y esto multiplicado por el voltaje de salida V_o , todo esto dividido para la multiplicación de frecuencia de trabajo f_s por la corriente a la salida del filtro i_o , por dos

$$L \geq \frac{D(1-D)^2 V_o}{2f_s i_o} \quad (8)$$

Para el cálculo del valor mínimo del capacitor del filtro RC se obtiene mediante la ecuación (9), donde C_{\min} debe ser mayor o igual a la multiplicación de la corriente de salida i_o

por el ciclo de trabajo D , dividido para la multiplicación de la frecuencia de trabajo f_s por la variación de la tasa de cambio del voltaje de salida ΔV_o tal como se muestra en la ecuación (9)

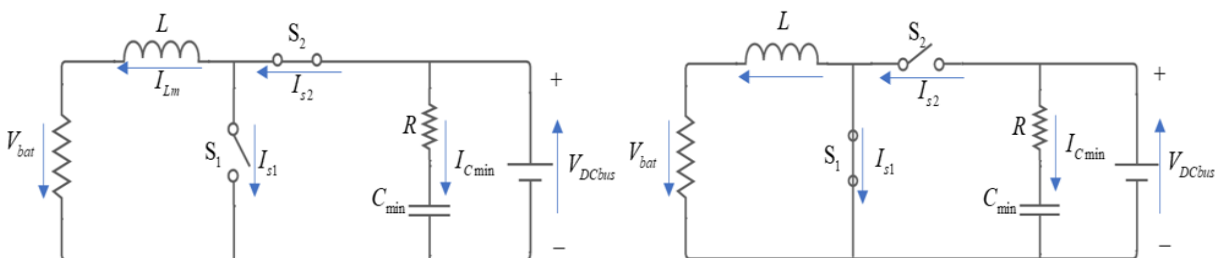
$$C_{\min} \geq \frac{i_o D}{f_s \Delta V_o} \quad (9)$$

Modelamiento del convertidor en modo Buck

La **Figura 14** describe como se configuran los interruptores para el modo Buck o reductor, entonces el sentido de la corriente se dirige hacia el lado contrario de la bobina cuando S_1 está abierto y S_2 está cerrado, así mismo cuando la conmutación de los switches cambia, ósea cuando S_1 está cerrado y S_2 está abierto, la corriente a través de los interruptores cambia de dirección y las cargas conectadas en este bus recibirán potencias negativas, entendiéndose como carga a la batería en este modo de operación, por lo que es ideal para la carga en un acumulador de energía.

Figura 14

Diagrama de conversor modo Buck (Reductor)



Nota. Cuando el conversor trabaja en modo Reductor o Buck, los interruptores no deben conmutar al mismo tiempo para evitar cortos en la bobina. Tomado de (Engineering, 2021)

Para el diseño de convertidor en modo Buck se requiere conocer de los valores de inductancia L y el valor del capacitor del filtro C_{\min} , primero se define el ciclo de trabajo D por la ecuación (10), que se usa para la conmutación de S_1 , en donde $V_{bat} = V_s$ que representa el

voltaje de la fuente hacia la izquierda del convertidor o voltaje de la batería, V_s es el voltaje a la

salida del filtro, tal como se muestra en
$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (10)$$

Para el cálculo del valor de la inductancia de la bobina en modo Buck, no se toma en cuenta que el valor del ciclo de trabajo, ya que en este modo no es necesario puesto que tanto para el modo Boost como para el modo Buck tiene el mismo ciclo de trabajo antes calculado. Entonces el valor de la inductancia esta dado por la ecuación (11), donde la inductancia para modo Buck L_{m_buck} debe ser mayor o igual a la multiplicación de la diferencia de uno menos el ciclo de trabajo D al cuadrado, por el voltaje de salida V_o , dividido para dos veces la corriente de salida i_o por la frecuencia de trabajo f_s así.

$$L_{m_buck} \geq \frac{(1-D)^2 V_o}{2i_o f_s} \quad (11)$$

Cabe indicar que, en este modelo solo se calcula una vez el valor del capacitor, ya que se usara el mismo filtro tanto para la corriente de salida del modo Boost como para la corriente de entrada al modo Buck, además el valor de la resistencia R es mínimo o despreciable y además el valor de la inductancia deben ser similares para ambos modos. Como se muestra en la ecuación (12).

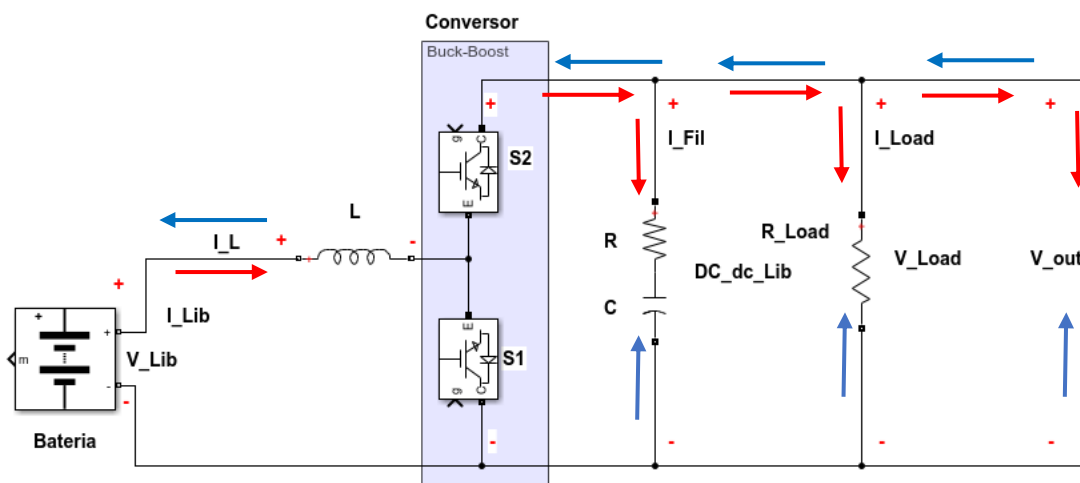
$$L \approx L_{m_buck} \quad (12)$$

Diagrama completo de un convertidor Buck-Boost DC/DC

La **Figura 15**, muestra el diagrama completo del convertidor bidireccional Buck Boost DC/DC a controlar en este trabajo de tesis, donde se usa los componentes y elementos antes calculados y los que se muestran en esta **Figura 15**. En esta topología el diodo de conmutación cumple la tarea de permitir el flujo de corriente de forma bidireccional, desde la batería hasta el bus de carga modo descarga en color rojo, y modo carga en color azul.

Figura 15

Diagrama completo de conversor Buck-Boost Bidireccional



Nota. El convertidor DC/DC, para este caso de estudio está configurado con dos IGBT's, el filtro RC, y una carga hacia su derecha, mientras que a su izquierda solo está la bobina y la planta o Bateria Tomado de Autoría Propia

Controlador para un conversor Buck-Boost DC/DC de Baterías

En este apartado se muestra el diseño del control del conversor Buck-Boost, para lo cual se establece un esquema general donde lo que se va a controlar es la tensión a través del conversor, en este sentido dentro de la literatura existen diferentes configuraciones de los convertidores de estado sólido como; reductor o Buck, elevador o Boost, y la combinación de los dos el conversor Buck-Boost, resultando este muy versátil, para aplicaciones en microrredes y sistemas híbridos de energía. Buck-Boost en comparación con los otros dos casos este tiene la posibilidad de, elevar o reducir el voltaje ya que posee esos dos modos, sin embargo, estos dos modos no pueden realizarse a la vez. Pero tiene las siguientes ventajas, i) disminución del número de semiconductores, ii) posibilidad de tener voltajes estables y constantes a la salida del conversor, independientemente del voltaje de entrada, iii) las pérdidas son despreciables, iii)

la tensión de salida puede ser filtrada de manera natural. Todo esto con el fin de obtener un voltaje de salida constante.

Entonces el objetivo de control es la obtención de un voltaje constante a la salida del convertidor, por ende, una potencia constante a la salida del bus de carga, controlando los modos de operación carga y descarga.

Arquitectura del controlador bidireccional para batería

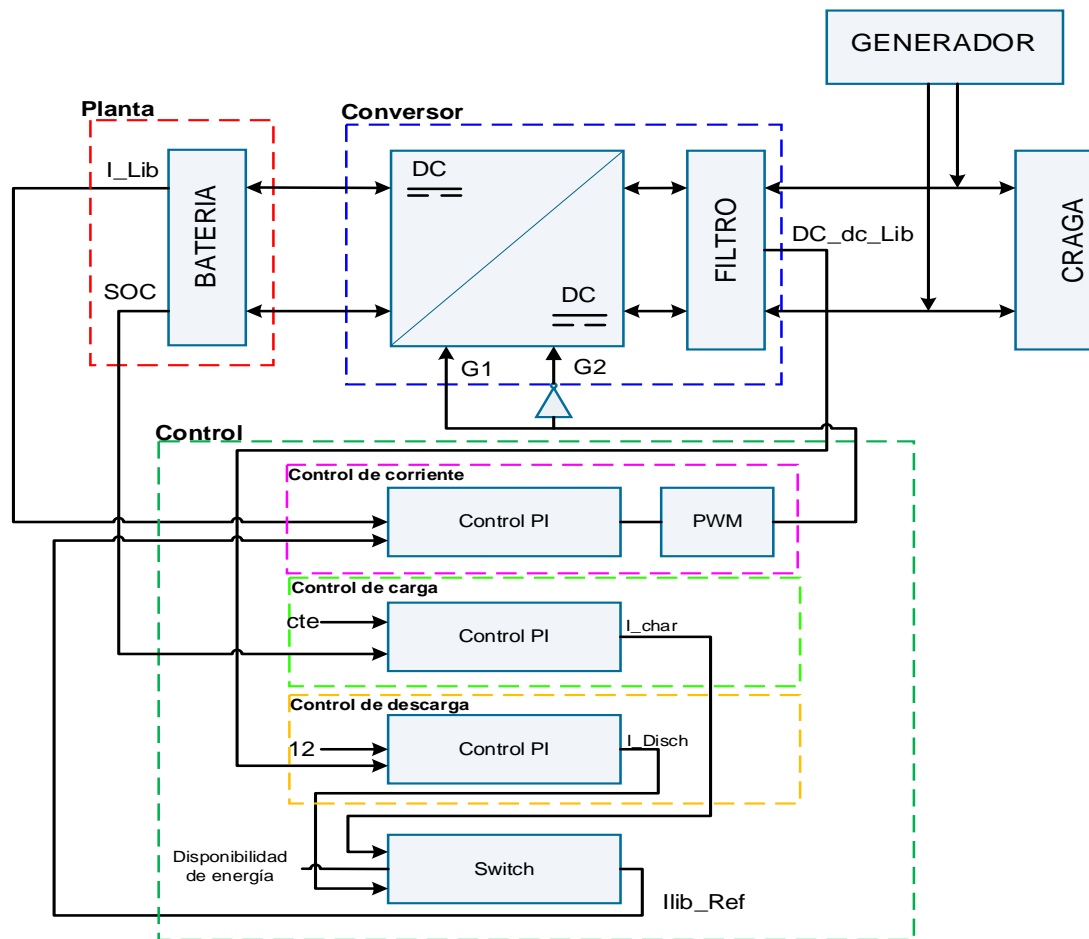
La arquitectura del controlador bidireccional para un convertidor de tipo Buck-Boost DC/DC se refiere a controlar la carga y descarga de una Batería. En la **Figura 16** se puede observar la arquitectura de control de la Planta o batería, la cual está conectado al convertidor Buck-Boost DC/DC, la salida pasa por un Filtro RC, para después conectarse a la carga, en este mismo punto denominado bus DC se conecta también un generador Diesel que tiene incluida una etapa de conversión AC/DC que nos es parte de esta investigación se lo define como fuente infinita y es quien entregará la potencia necesaria para que se cargue la batería cuando corresponda.

La acción de control final es la encargada de generar las señales al PWM para producir S1 y S2. En la Figura 16 se puede observar el controlador total aplicado al convertidor DC/DC, el mismo que consta de un control de corriente, un control de carga basado en SOC, y un control de descarga que controla el voltaje a entregarse a la carga (DC_dc_Lib). Además, se incluye un control selector de modo de operación de la batería que define la corriente de referencia I_{lin_Ref} asignada al control de corriente, si está en modo carga la referencia es I_{char} caso contrario la referencia será $I_{Dischar}$ equivalente a operación en carga o descarga respectivamente. Se puede notar que $I_{Dischar}$ está relacionada directamente con la potencia requerida para abastecer el bus de carga por lo tanto se controla la tensión en el bus de carga, mientras que I_{char} se genera del control de SOC la cual a su vez define la energía máxima o mínima disponible en la batería.

Para la arquitectura de los controladores se tienen en cuenta las señales tanto de entrada a los controladores como las señales de salida de estos. Entonces, para el control de corriente cuyo error es generado a partir de la resta de la señal de corriente de la batería I_{Lib} con la señal proveniente de la salida del selector de carga o descarga correspondiente a la corriente de referencia I_{lib_Ref} , este error se dirige a la entrada del controlador de tipo PI, y la señal de control se modula con un PWM, generando así la señal que se dirigirá a cada uno de los IGBT's G_1 y G_2 una directamente hacia al pin de control de G_2 y el complemento de ella hacia el pin de control de G_1 . El control de carga usa de referencia el valor de SOC dinámico y además posee un control de voltaje de la salida de la batería este algoritmo se detalla más adelante. Para el controlador de descarga, el error se genera cuando se restan las señales provenientes de una referencia de voltaje y el voltaje a la salida del filtro RC DC_{dc_Lib} , este error entra a un controlador de tipo PI y su salida sea conectada también al selector de carga o descarga, el detalle de este controlador se describe más adelante. El selector define el modo de operación es decir si opera en modo carga la I_{lib_Ref} toma el valor de la salida del control I_{char} si opera en modo descarga la referencia del control de corriente corresponde a $I_{Dischar}$.

Figura 16

Control Bidireccional para Batería



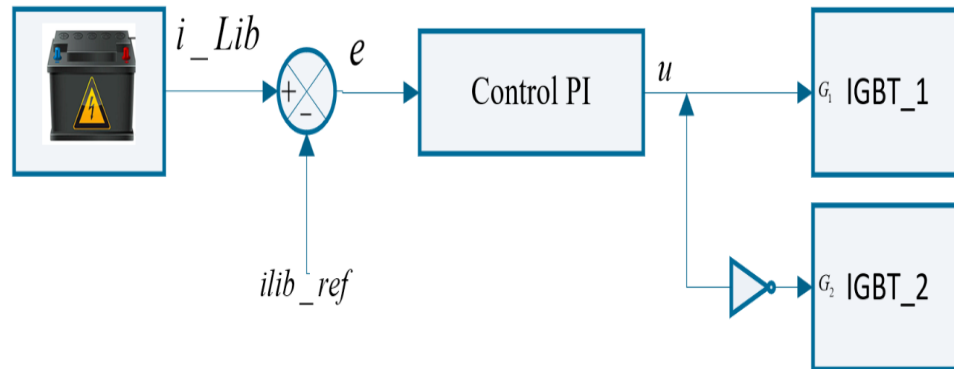
Nota. Arquitectura de controladores para control bidireccional de batería

Diseño de los controladores bidireccionales

En la **Figura 17**, se muestra el diagrama para el control de corriente, en el cual al punto suma como entrada ingresa I_{Lib} (corriente de la batería), y se le resta la entrada I_{lib_ref} (corriente de referencia respecto a la salida del selector de carga o descarga), a partir de esto se genera el error (e) el cual ingresa al control PI, y como salida del controlador se tiene la señal de control (u) la misma que ingresara posteriormente a un módulo PWM para regular la conmutación de los transistores G_1 y G_2 .

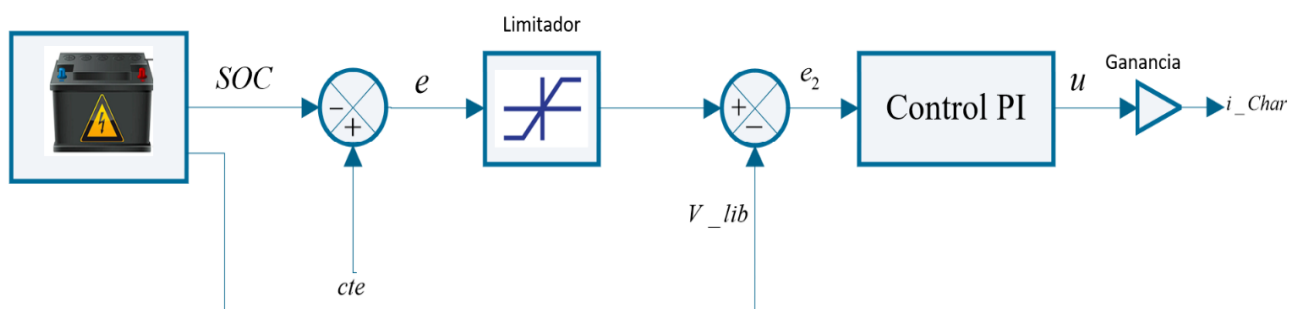
Figura 17

Controlador de corriente



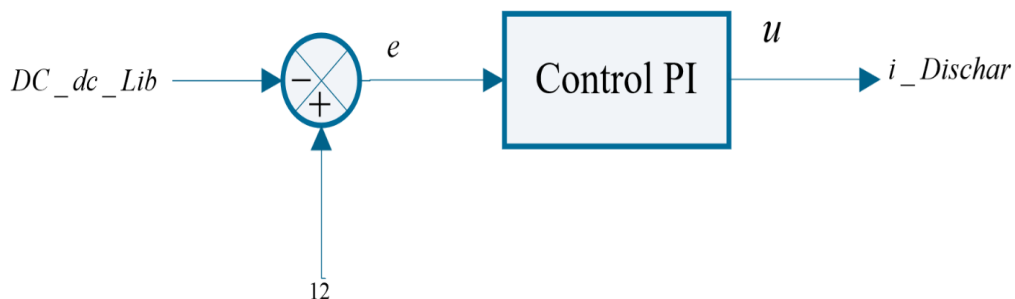
Nota. El controlador es de tipo PI con integración inicial de 0.054 Autoría Propia

El control de carga presentado en la **Figura 18**, tienen como entradas al punto suma, el SOC (estado de carga de la batería) y una constante SOC (define los límites mínimos y máximos de carga y descarga de las baterías), la diferencia de estas dos entradas da como resultado el error e el cual ingresa a un limitador cuyo rango es de menos uno a uno, después de haberse limitado el error ingresa a un segundo comparador, que representa el error error 2 (e_{2c}) generado entre V_{Lib} (voltaje en la batería) y error saturado, el mismo que ingresa al controlador PI el mismo que genera la señal saturada entre cero y el mayor voltaje que puede tomar el bus de carga la señal de control (u) la misma que pasa por una ganancia para convertir el signo y de esa forma se obtiene la I_{char} (corriente carga).

Figura 18*Controlador de carga*

Nota. La salida total del controlador de carga se multiplica por una ganancia negativa para que pueda ingresar al Selector de carga o descarga

La **Figura 19**, presenta el control de descarga, en el cual como primera entrada negativa al punto suma se tiene DC_dc_Lib (voltaje de salida del conversor), como segunda entrada positiva se tiene una constante que representa el mayor voltaje que puede haber en la batería de forma nominal, la diferencia de estas dos entradas produce el error (e) el cual ingresa al control PI y proporciona la señal de control denominada $I_Dischar$.

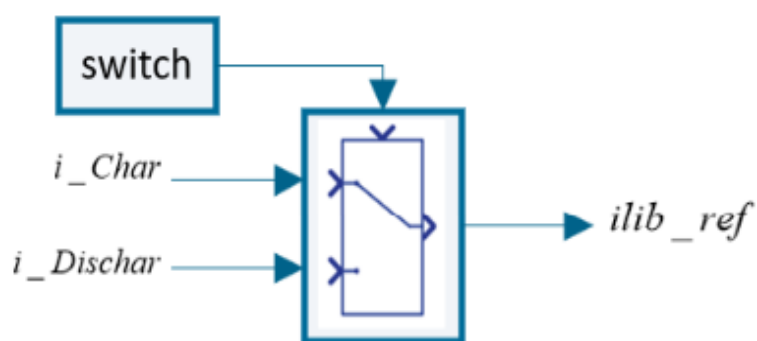
Figura 19*Controlador de descarga*

Nota. La constante que ingresa al punto de suma positivo tiene que ver con la implementación para este caso y toma el valor de 12 ya que es el máximo valor de la batería

Finalmente, el control selector de modo de operación de la batería **Figura 20**, corresponde a un switch o selector de carga o descarga es habilitado o deshabilitado según la demanda lo finalmente, el selector de modo de operación requiera lo que permite que el sistema esté en el estado de carga o descarga, esta conmutación, puede o no venir desde la salida de un sistema de gestión.

Figura 20

Selector de carga o descarga switch



Nota. El selector de carga o descarga permite funcionar al control de los dos modos cuando se requiera

Capítulo IV

Implementación del control bidireccional en el sistema Typhoon HIL

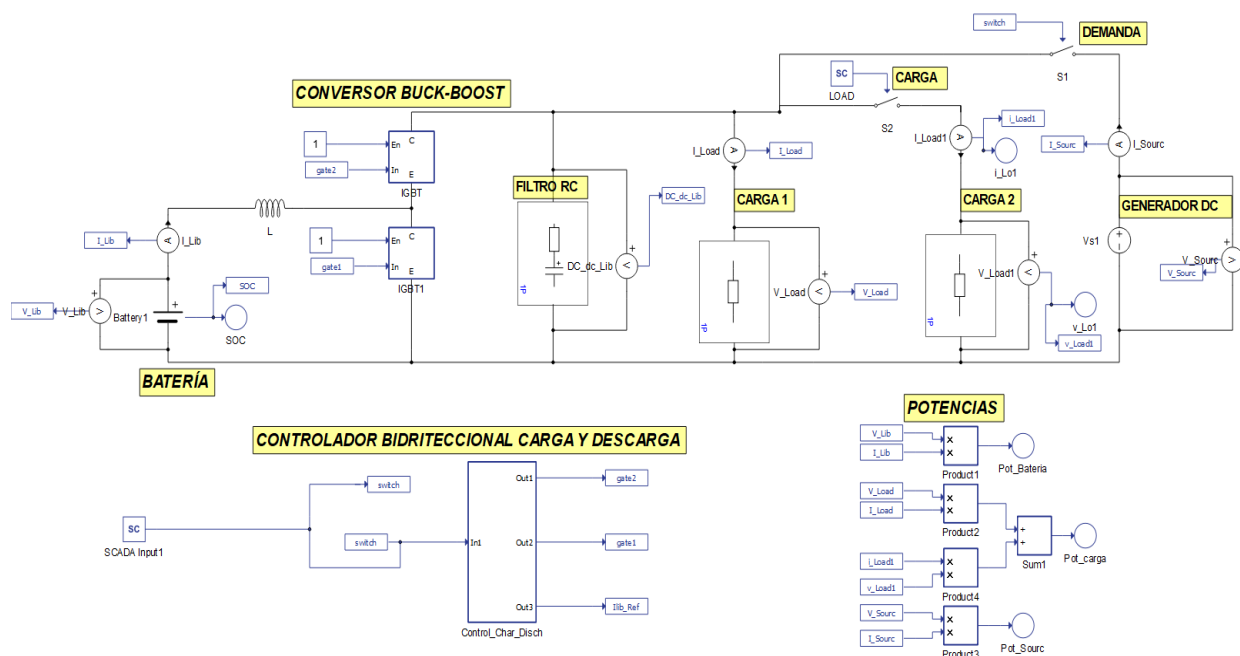
En este capítulo se describe la implantación del sistema dentro de un entorno Hardware in the Loop HIL - Typhoon HIL H-402, para lo cual se empieza por la programación de todo el sistema en el entorno de Editor esquemático, incluyendo el controlador bidireccional tal cual, como el explicado el capítulo anterior, posteriormente el controlador es programado en el DSP.

Diagrama esquemático del control bidireccional

En la **Figura 21** se presenta el esquema de implementación de la batería con el convertidor bidireccional Buck-Boost DC-DC y para pruebas preliminares los controles descritos en el apartado anterior. En la literatura se tiene gran variedad de configuraciones para el convertidor de interés, en este caso se usó la configuración con dos interruptores de estado sólido IGBT's controlados por controles PI. La batería está conectada al convertidor y a la salida se considera una carga. Dicha configuración garantiza a la salida del convertidor un valor de tensión estable y constante en el bus de carga, independientemente si la entrada es un valor no constante. Posteriormente se describe cada uno de los elementos configurados.

Figura 21

Esquema completo de control bidireccional para batería en Typhoon HIL



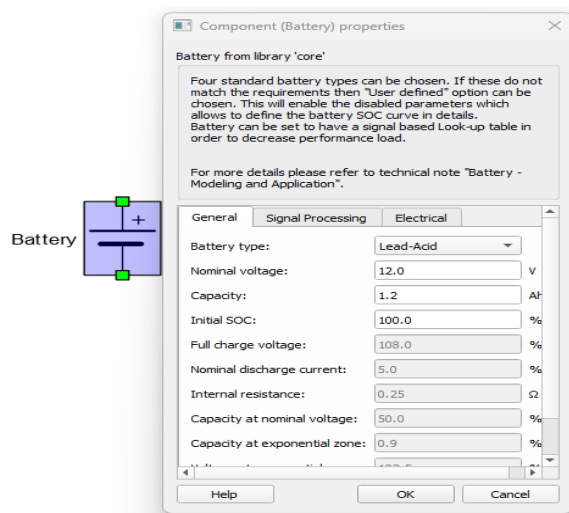
Nota. Esquemático elaborado en editor de software Typhon HIL

Configuración de la batería

La batería utilizada para este proyecto se muestra en la **Figura 22**, tiene la posibilidad de configurarse de cuatro modos distintos los cuales son: Litio-Ion; Niquel Cadmio; Niquel-Metal-Hidrido; Definido por Usuario, en este caso se usa las baterías de Plomo Acido, en la cual se le asigó un voltaje nominal de 12 Voltios, una capacidad de 1.2 [Ah] y un SOC inicial (porcentaje de carga) del 100%. Adicional se configura el SOC como una variable de salida ya que este parámetro será usado más adelante en los controladores.

Figura 22

Batería configurada en Typhoon HIL



Nota. La configuración de la batería en typhoon HIL, no permite acceder a la configuración de la capacidad de carga en [Ah], este apartado se configura por defecto cuando se cambia el voltaje nominal de la batería

Diseño del convertor bidireccional Buck-Boost

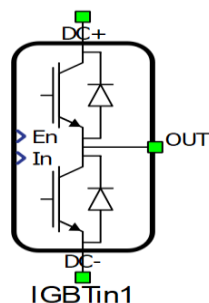
Para la implementación del convertor bidireccional Buck-Boost DC-DC como elementos principales se necesitamos los transistores IGBT, el propio software Typhon HIL no cuenta directamente con los IGBT como elementos individuales, más bien se los presenta en un módulo que consta con dos transistores IGBT.

Componente IGBT Leg

En el software de Typhoon HIL este componente se encuentra con el nombre de *IGBT Leg* como se ve en la **Figura 23**, se encuentra en la librería y se lo coloca en el esquema de trabajo.

Figura 23

Componente de dos interruptores IGBT Leg

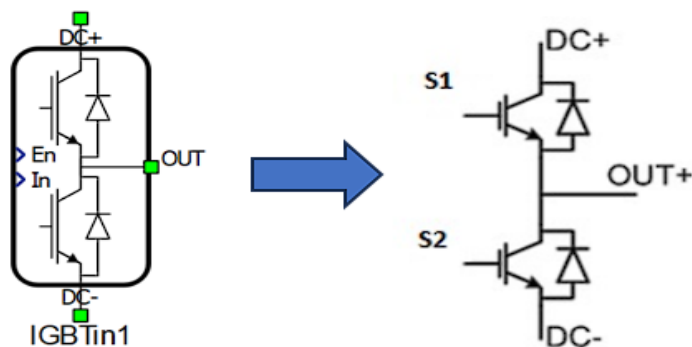


Nota. El componente IGBT Leg este compuesto por dos IGBT's individuales conectados en un punto común y en este punto tiene su salida

En la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se puede observar la estructura interna del transistor IGBT Leg, para este caso solamente se hace uso de uno solo, el funcionamiento es similar a como trabaja normalmente un solo transistor.

Figura 24

Estructura interna de componente IGBT Leg



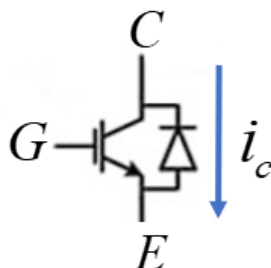
Nota. Para la implantación en Typhoon HIL del IGBT Leg, se debe conocer bien su estructura interna

En la **Figura 25**, la corriente (i_c) que va a circular desde el colector (C) hasta el emisor (E) se la controla mediante una tensión entre puerta (G) y emisor (E). La operación del transistor se da cuando se aplica un nivel de tensión en la puerta (G) permitiendo el paso de

corriente de colector, al quitar la tensión de la puerta sigue existiendo un paso de corriente desde el colector hacia el emisor, esto es debido a la existencia de una capacitancia parásita entre la puerta y el emisor, este condensador se carga y no tiene como descargarse permitiendo el paso de corriente. Con 12 [V] aplicados a la puerta conduce, con 0 [V] no conduce.

Figura 25 Funcionamiento del IGBT

Funcionamiento del IGBT



Nota. Para la conexión de los dos IGBT's del Buck-Boost se necesita de la conducción de la corriente en el mismo sentido

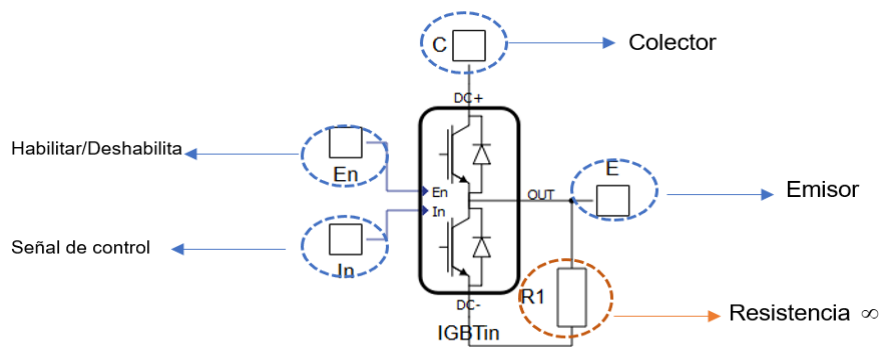
Con el objetivo de usar un solo transistor por componente se realiza la conexión mostrada en la, para lo cual se realiza un puente entre el pin de salida (OUT) y el pin de la alimentación (DC -) con una resistencia R1, cuyo valor es infinito, con dicho artificio se anula un transistor y por consiguiente se puede usar solo un IGBT.

Al tener el módulo del transistor IGBT configurado para el funcionamiento de uno solo, se integra en un subsistema denominado IGBT el cual es colocado en el programa principal (Root), y se realiza la conexión de acuerdo con la configuración del conversor bidireccional Buck Boost DC-DC (Ver **Figura 15**), cabe mencionar que se realizó unos pequeños cambios en la topología a fin de un correcto funcionamiento de manera simulada e implementada. Como el entorno de programación del diagrama de Typhoon HIL no existe el IGBT individual, sino solo la configuración de LIGBT Leg, que consta de dos interruptores de estado sólido unidos el S1 por su emisor y S2 por su colector (Ver **Figura 24**), y para obtener un IGBT individual, se coloca

una resistencia de valor infinito R1, entre el emisor y colector común de S2, dejando habilitado solo S1 para obtener la configuración requerida para el convertor bidireccional.

Figura 26

Configuración de IGBT's individuales



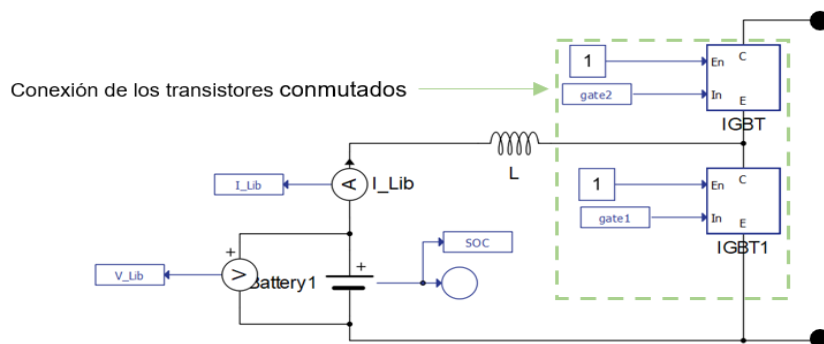
Nota. Esta configuración se agrupa en un subsistema, denominado IGBT

Diselño del Convertor Buck-Boost DC/DC en Typhoon HIL

Para el diseño del convertor DC/DC de tipo Buck-Boost Bidireccional de la **Figura 15**, se conectan los dos IGBT's Edel IGBT 1 y C del IGBT 2 conectados en serie y cuyos terminales de control estén separados (gate 1 y gate 2), con la finalidad de que las señales de control hacia los interruptores S1 y S2 estén separadas y complementadas como se ve en la **Figura 27**

Figura 27

Convertor Bidireccional Buck-Boost



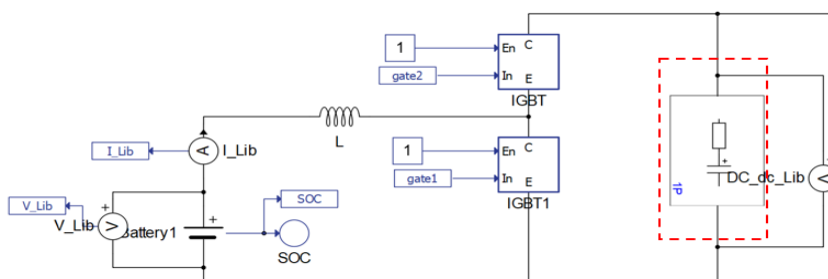
Nota. Los dos subsistemas conforman el convertor Buck-Boost

Configuración del Filtro RC en Typhoon HIL

En la **Figura 28**, se implementa al esquema un filtro de tipo RC cuyos valores fueron calculados en la sección Modelamiento del convertidor en modo Boost del capítulo tres, se debe tomar en cuenta la tensión de salida del conversor DC/DC, ya que, según el comportamiento de este voltaje, la potencia suministrada a la carga tendrá menos o más variaciones, lo que implica en la preservación de las cargas o dispositivos conectados al sistema.

Figura 28

Filtro RC a la salida del conversor Buck-Boost



Nota. En el filtro RC, se mide el voltaje de salida del conversor DC_dc_Lib , importante para los controladores.

Implementación del controlador bidireccional Buck-Boost DC/DC en Typhoon HIL

Para la conexión de los componentes o elementos del controlador bidireccional, se toma en cuenta la tarea del controlador en el sistema, es decir que cuando la batería este cargada es decir SOC al 100%, esta debe entregar toda su capacidad de potencia a la carga a través del conversor Buck-Boost, y operando en modo Boost, cuando la batería se encuentre descargada es decir SOC diferente de 0%, dependiendo de la demanda en el bus de carga, el generador DC o fuente infinita entra en funcionamiento y alimenta a la carga, y a la vez carga la batería, la suma modular de las potencias de la batería más la potencia consumida por las cargas debe ser igual a la potencia suministrada por el generador la ecuación (12) muestra el balance de

potencia, en donde Pow_Sour corresponde a la potencia del generador, $|Pow_Bat|$ a la potencia en la batería la cual toma valores positivos en modo descarga y negativos en modo carga, $|Pow_Load|$ es la potencia consumida en el bus de carga.

$$Pow_Sour = |Pow_Bat| + |Pow_Load| \quad (12)$$

Ahora se realiza el control de corriente cuya señal de salida controla la operación de los IGBT's a través del PWM, el error a controlar es producto de la diferencia entre la corriente de la batería I_Lib y la corriente de la salida de la demanda $Ilib_Ref$, cuyo resultado es enviado al controlador de tipo PI con constantes ajustadas de manera heurística con valores de $Kp = 0.05$ y $Ki = 10$, respectivamente. Cabe indicar que, para efectos de simulación el Software Typhoon HIL proporciona un PWM dentro del componente, optimizado para cada conversor, esto con la finalidad de no consumir recursos adicionales del computador. Ahora para la implementación del sistema HIL estos controladores se programan en el software Simulink, y es en este software donde si se debe colocar el bloque de PWM, configurado de tal forma que la tasa de operación debe ser la misma en los dos softwares.

Para el control de carga se toma en cuenta el nivel del estado de carga de la batería SOC , para la obtención del error junto con el mayor porcentaje que puede alcanzar, esta señal se la normaliza entre cero y uno, para que se genere el siguiente error entre el voltaje de la batería V_Lib , luego esta señal va a la entrada del controlador de tipo PI cuyas constantes son ajustadas con un método heurístico llegando a los siguientes valores $Kp = 40$ y $Ki = 2000$, además de dejar saturada su salida entre 0 y 12, valor de máxima tensión en el generador DC, finalmente la salida del controlador se va al switch de demanda pasando por una ganancia negativa ya que el error de control hace que tome valores negativos.

Luego se realiza el controlador de descarga donde el error se genera al restar el voltaje que se genera a la salida del inversor o en el filtro DC del valor máximo que puede tomar la

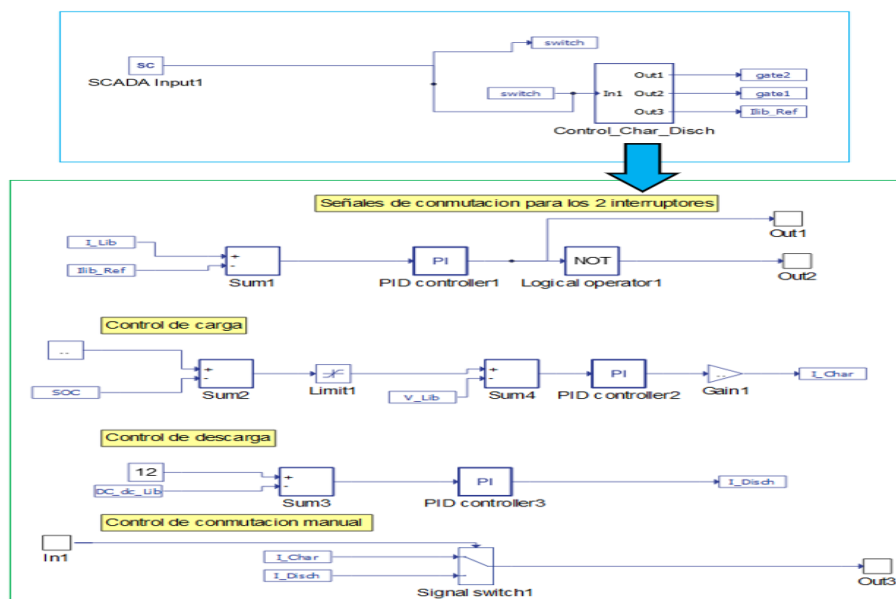
salida de voltaje de la batería, esta señal pasa por un controlador de tipo PI, cuyas constantes fueron ajustados usando un método heurístico con los siguientes valores, $K_p = 0.25$ y $K_i = 50$, y una integración inicial $in_int = 0.54$, y su salida se dirige al switch de demanda.

Para finalizar el control del switch de demanda se lo realiza en el software Simulink, donde se puede controlar según la demanda que requieren las cargas y también el estrado de carga, y su salida I_{lib_Ref} se retroalimenta hacia el error del primer controlador de corriente. Tal

como se muestra en la **Figura 29**

Figura 29

Diagrama de control para el convertor bidireccional



Nota. El controlador bidireccional para el convertor Buck-Boost, se debe considerar que todos los componentes trabajan a la misma tasa de ejecución $T_s = 100e^{-6}$

Capítulo V

Implementación experimental del controlador bidireccional

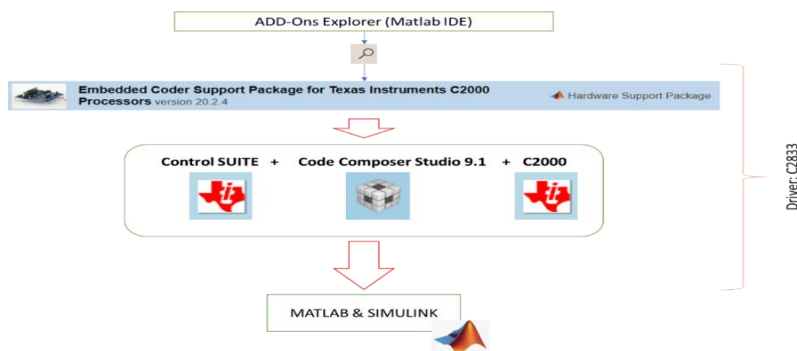
En este capítulo se describe las aplicaciones que se realizan para la implementación experimental del control bidireccional en la DSP para el convertor Buck-Boost. La planta, el convertor, el filtro y las cargas están programadas en el sistema físico Typhoon HIL H402, mientras que el canal de comunicación, y la programación de los controladores están en el software Simulink, y finalmente, el controlador físico está en la tarjeta FPGA junto con la DSP.

Configuraciones de software requerido para la implementación del control la DSP.

Para el desarrollo previo a la implementación del controlador PI Bidireccional en el software Simulink son necesarios paquetes de soporte para poder cargar el programa de Simulink hacia la tarjeta DSP la cual previamente debe estar colocada y conectada hacia los terminales I/O del equipo *Typhoon HIL* tal como se muestra en la **Figura 30**. A través de la cuenta de usuarios online, tanto de Matlab como de Texas Instruments, se realiza el proceso descrito en la Figura 30, con lo cual el software está listo para poder cargar el controlador hacia la tarjeta.

Figura 30

Softwares para comunicar Matlab y DSP.



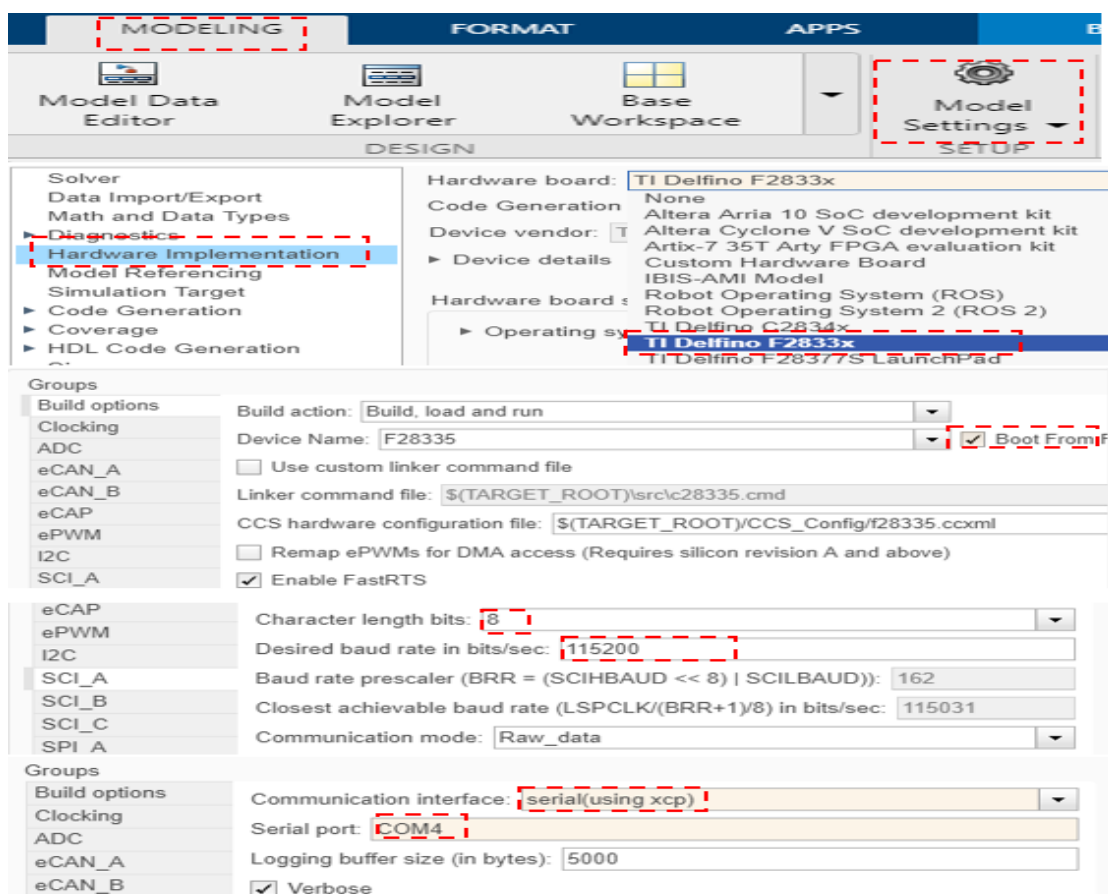
Nota. Se necesita de los tres complementos de software para un correcto funcionamiento del sistema

Configuraciones de comunicación entre Simulink y la DSP

Para cargar el programa que contiene el controlador en la tarjeta DSP, existe una manera de comprobar si la PC reconoce el sistema Typhoon dentro del administrador de dispositivos, nos dirigimos hacia los puertos COM, usamos el número de puerto que tome el nombre de XDS100. En la **Figura 31** se muestra la configuración del software Simulink, primero desde la pestaña MODELING se configura el dispositivo seleccionando el dispositivo de Texas instrument TI Delfino F2833X, posteriormente se define la operación boot from. Finalmente se verifica las características de la comunicación entre ellas 8 bits, velocidad de 15200 bps, comunicación serial y la selección del puerto físico en este caso COM4.

Figura 31

Configuraciones en Simulink



Nota. Se deben realizar todos estos pasos con el dispositivo físico conectado al PC

Características de la tarjeta DSP TMDSCNCD28335

En la **Figura 32** se aprecia una tarjeta DSP del sistema Typhoon HIL, esta se introduce en la ranura de la tarjeta de conexión que se conecta al dispositivo H402, para realizar la implementación de manera física del controlador. Además, la **Tabla 1** muestra las características de la tarjeta DSP.

Figura 32

Tarjeta DSP TMDSCNCD28335



Nota. Tarjeta DSP de Texas Instruments Tomado de. (Instruments, 2023)

Tabla 1

Características de tarjeta DSP

Parámetros	Descripción
CPU	C28X
Frecuencia	150 MHz
Memoria Flash	512 kB
RAM	68 kB
Resolución ADC	12 bit
MIPS	150
UART	3
CAN	2
PWM	12

Nota. Especificaciones de la tarjeta DSP Tomado de (Instruments, 2023)

Estructura de comunicación entre dispositivos.

Antes de programar el controlador en el software Simulink y cargarlo a la tarjeta DSP se consideran las direcciones de los pines en el dispositivo físico y las direcciones de entradas digitales para el software, la **Tabla 2** muestra las direcciones GPIO de la tarjeta a considerar para la implantación. De las cuales en este trabajo de investigación se usan DI32, DI30, DI28 Y DI27.

Tabla 2

Pines Digitales/ePWMs

Typhoon	HIL	DSP	Typhoon	HIL	DSP	DSP1 and DSP3
Digital Output		Digital Input	Digital Input		Digital Output	Digital Output
DO32		GPIO-24/ EQEPA-2	DI32		GPIO-00/EPWM-1A	GPIO-00/EPWM-1A
DO31		GPIO-25/ EQEPB-2	DI31		GPIO-02/EPWM-2A	GPIO-02/EPWM-2A
DO30		GPIO-26/ EQEPI-2	DI30		GPIO-04/EPWM-3A	GPIO-04/EPWM-3A
DO29		GPIO-14	DI29		GPIO-00/EPWM-4A	GPIO-06/EPWM-4A
DO28		GPIO-15	DI28		GPIO-08/EPWM-5A	GPIO-08/EPWM-5A
DO27		GPIO-16	DI27		GPIO-10/EPWM-6A	GPIO-10/EPWM-6A
DO26		GPIO-17	DI26		GPIO-01/EPWM-1B	GPIO-01/EPWM-1B

Nota. Para la implementación se usó; DI32, DI30, DI28, y DI27. Tomado de (Instruments, 2023)

Programación del controlador en simulink

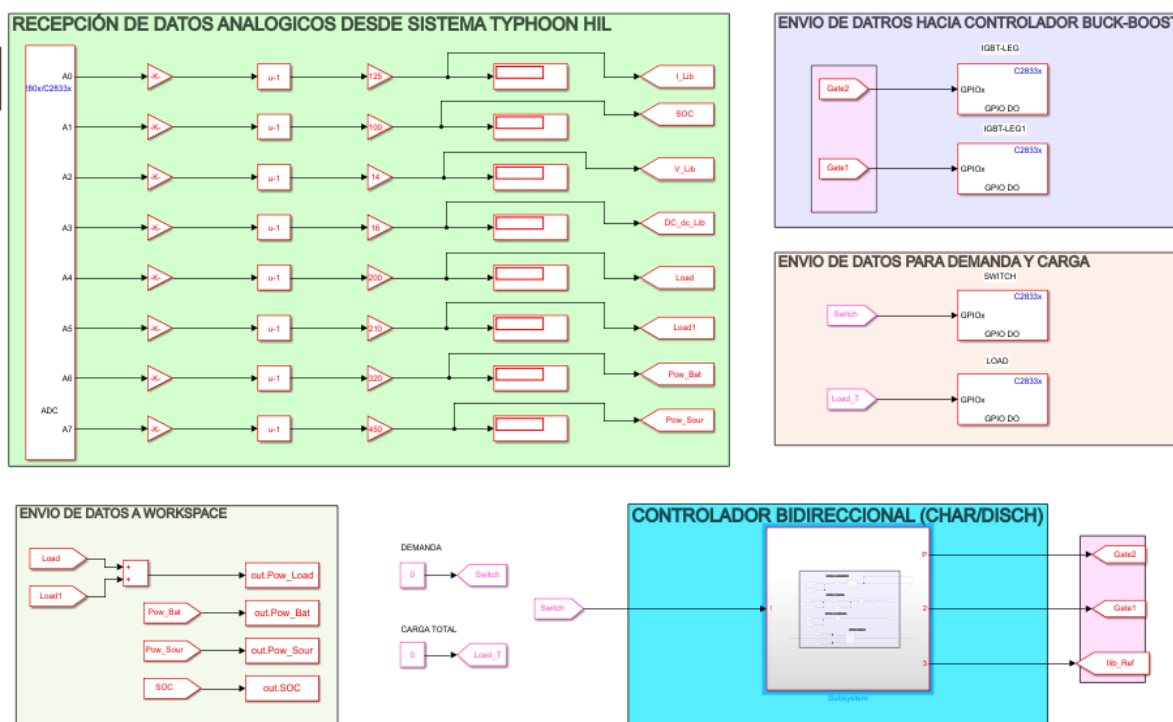
Como se ve en la **Figura 33**, en primer lugar, se requiere de un bloque ADC C280x/c2833x que corresponde al canal de comunicación, ubicado en la librería se busca el paquete previo instalado “*Embedded Code Support Package for Texas*” y se escoge el bloque C2833X configurado de tal forma que todos sus canales de comunicación habilitados, para la recepción de todos los datos analógicos requeridos tanto por el controlador como para las respuestas gráficas, estas señales están acondicionadas para que las salidas digitales de

sistema Typhoon HIL se puedan visualizar de manera analógica en los displays del software Simulink.

Una vez adquirido las señales dentro del software Simulink, se desarrolla el controlador como se ve en la **Figura 33**, y las salidas del controlador se envían a los bloques que se encuentren conectados al Typhoon para este caso dos GPIOx GPIO DO referentes a salidas digitales, que van desde Simulink hacia Typhoon HIL, y dos GPIO DO hacia los interruptores de Demanda y Carga respectivamente.

Figura 33

Programación de controlador bidireccional en Simulink



Nota. Entre los principales componentes para el control es sin duda el canal de comunicas ADC

Implementación del algoritmo de control PI para control bidireccional

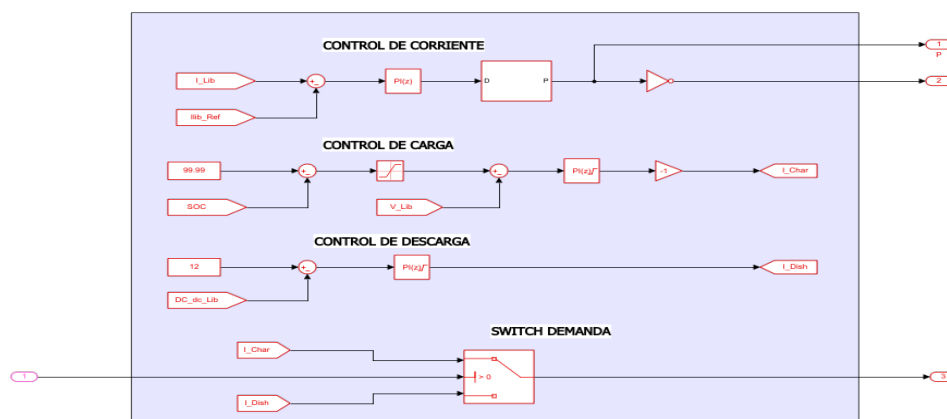
El controlador bidireccional está programado en el software Simulink, aquí es donde se incluye el bloque de PWM, configurado con una tasa de ejecución de $100e^{-6}$ que está

programado también en el software Typhoon HIL tal como se ve en la **Figura 34**. Se requiere configurar los siguientes elementos:

- **Set Point.** Se refiere al cambio en la demanda o un cambio en el bus de carga, para este estudio las cargas siempre están en paralelo, y son de potencia constante de tipo resistivas.
- **Realimentación.** Es la salida del switch selector de modo de operación.
- **Errores de Control.** Los errores de control son los generados por la resta de las señales proveniente del canal de comunicación, de las señales de referencia para cada controlador como se en la **Figura 34**.
- **Controladores PI's discretos.** Son los bloques de controladores programados en Simulink junto con el bloque de PWM, configurados a una tasa de ejecución similar a la tasa de ejecución de Typhoon HIL.
- **Salida PWM (bloque PWM).** Como en la implementación total del sistema el controlador y todas sus señales están en Simulink y los componentes como el conversor DC/DC programado en Typhoon ya no cuentan con un PWM interno se requiere de un PWM en Simulink que se pueda cargar a la tarjeta DSP.

Figura 34

Esquema de control desarrollado en Simulink



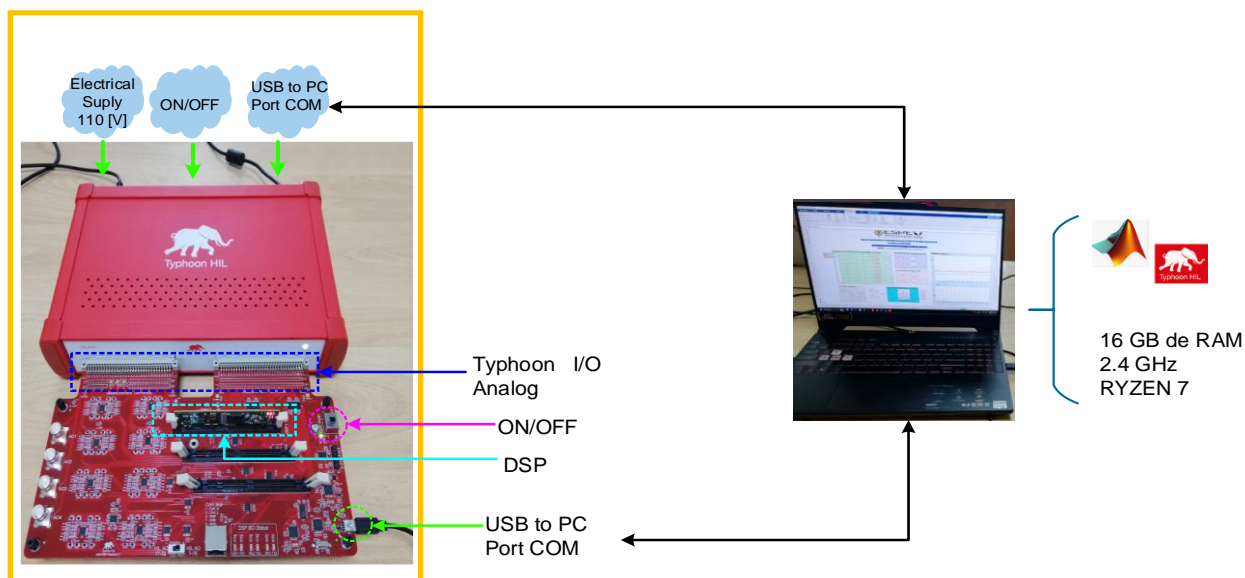
Nota. Todos los componentes del controlador son discretos y con el mismo periodo de muestro

Conexión del dispositivo H402 con el ordenador

El entorno de implementación de Conversores en el sistema Typhoon HIL H402, y el Controlador en la tarjeta DSP, se muestra en la **Figura 35**, donde se ve el modo de conexión entre el sistema HIL y la PC, donde se observa de izquierda a derecha y de arriba abajo, la alimentación de corriente, el botón de encendido y apagado, en el recuadro verde se muestra los pines de conexión entre el sistema Typhoon HIL H402, en recuadro blanco muestra la tarjeta DSP en su ranura de conexión, el botón de encendido y apagado de la FPGA, y el puerto de conexión entre la FPGA y el PC. Por otro lado, se muestra los softwares que van a estar interactuando entre si dentro de la PC host, por lo cual se requiere especificaciones mínimas para el computador, entre las principales son: RAM de 8 recomendado 16 GB, Procesador core i5 o superior, en AMD Ryzen 5 recomendado Ryzen 7 series 5000 o superior, a 2.2 recomendado 2.4 GHz.

Figura 35

Conexión física entre H402 y PC



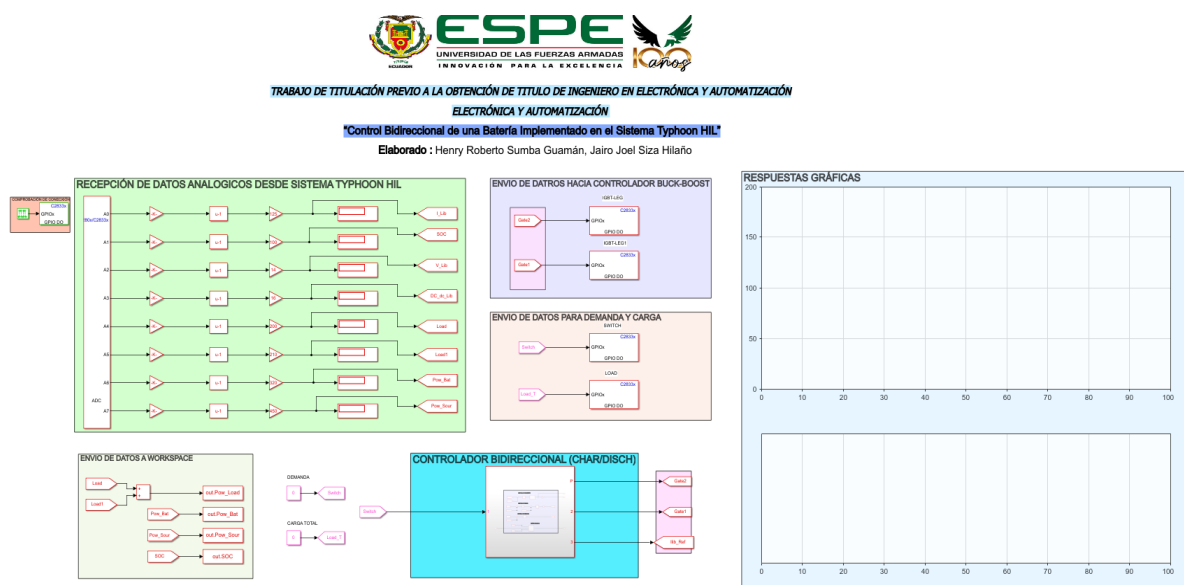
Nota. Esta implementación fue realizada en un Pc Ryzen 7 series 6000 y RAM 16 GB

Transferencia del controlador hacia la DSP

Dentro del software Simulink, en la pestaña de carga a dispositivo, se toma un tiempo antes de completar la carga y una vez completada, las conexiones que tienen el mismo periodo de muestreo se ponen de un color similar en este caso rojo como se ve en la **Figura 36**, si existe otro elemento con otro periodo de muestreo mostrará un color diferente.

Figura 36

Carga de los controladores en la DSP



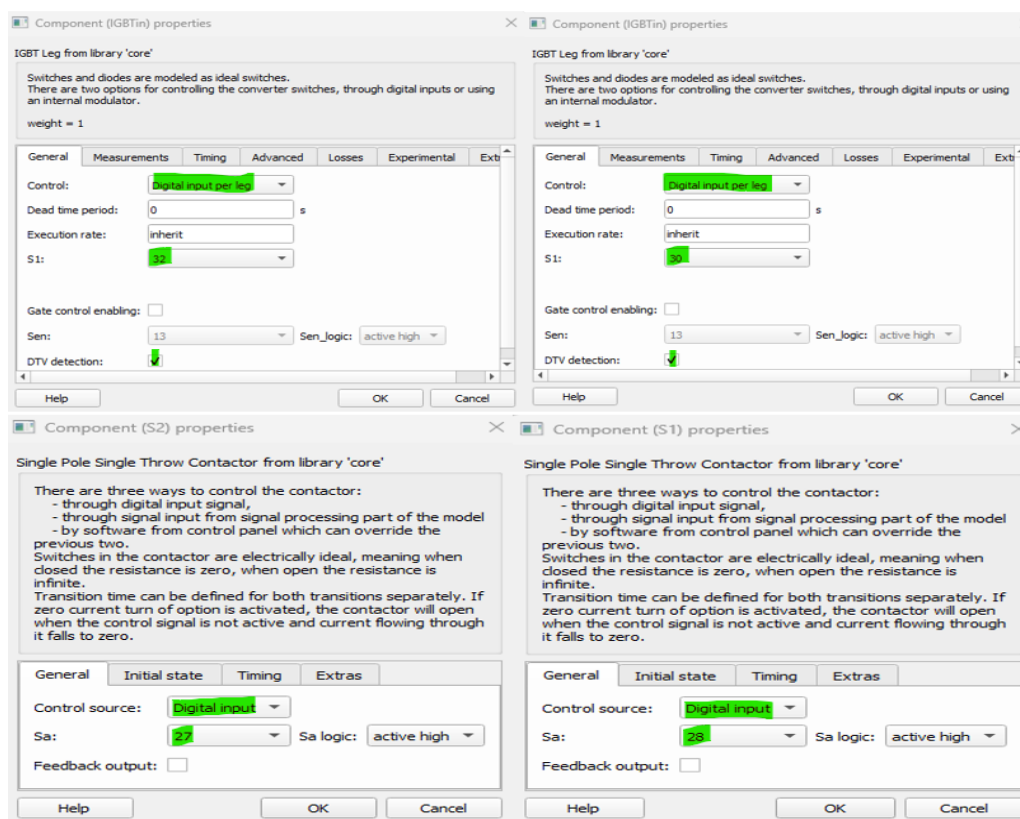
Nota. Cuando se completa la carga y si todos los acondicionamientos están correctos el simulink comienza a medir y aparecen valores respecto al sistema en los displays de Simulink

Transferencia de la planta al sistema Typhoon HIL H402

Antes de cargar el diagrama esquemático al sistema físico HIL H402, se deben configurar los componentes y elementos que van a realizar acciones entre los dos softwares, es decir debemos colocar las entradas digitales que se van a usar de acuerdo a la Tabla 2, tal como se observa en la **Figura 37**, además de la configuración de la tasa de ejecución o periodo de muestreo seteada en $100e^{-6}$, este periodo de muestreo debe ser el mismo en los dos softwares (Simulink y Typhoon HIL).

Figura 37

Configuración de entradas digitales de elementos en Typhoon HIL

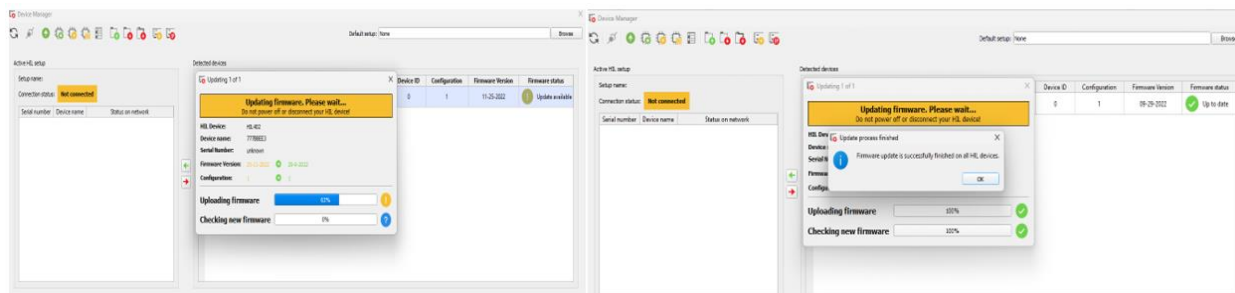


Nota. Se usan las entradas digitales correspondientes a las GPIO descritas en la **Tabla 2**. Realizado estos cambios y retirado el control del esquemático en el Typhoon HIL, está listo para ser compilado y cargado el equipo el diseño desarrollado anteriormente para simulación hacia el equipo real.

Cuando el dispositivo está cargando los elementos del sistema o planta se actualizan todos los Firmwares del equipo Typhoon HIL físico H402 tal como se muestra en la **Figura 38**, es necesario realizar esta tarea siempre que el dispositivo lo requiera, caso contrario no dejara cargar el programa.

Figura 38

Actualización de firmware de dispositivo H402



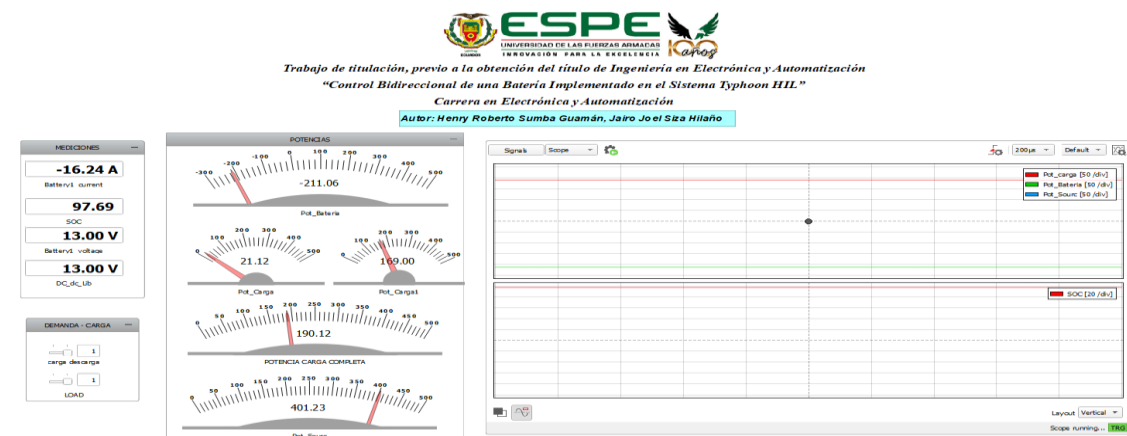
Nota. Este requerimiento se lo realiza cada vez que el dispositivo H402 cambia de PC

Diseño de la Interfaz HMI para monitoreo de HIL SCADA

En la **Figura 39**, se muestra una pantalla de supervisión del sistema implementado en el cual se puede observar las formas de onda de las distintas etapas del convertidor, tales como el voltaje proveniente de cada rama de inversor y sus desfases correspondientes también las corrientes antes y después del filtro y las tensiones que llegan a la carga. También consta de un la activación o conexión de la carga.

Figura 39

HMI SCADA de controlador bidireccional



Nota. La ventana de supervisión HMI SCADA, las señales desde esta deben estar

condicionadas de tal forma que el controlador pueda tener un buen desempeño en tiempo real

Capítulo VI

Análisis y discusión de resultados

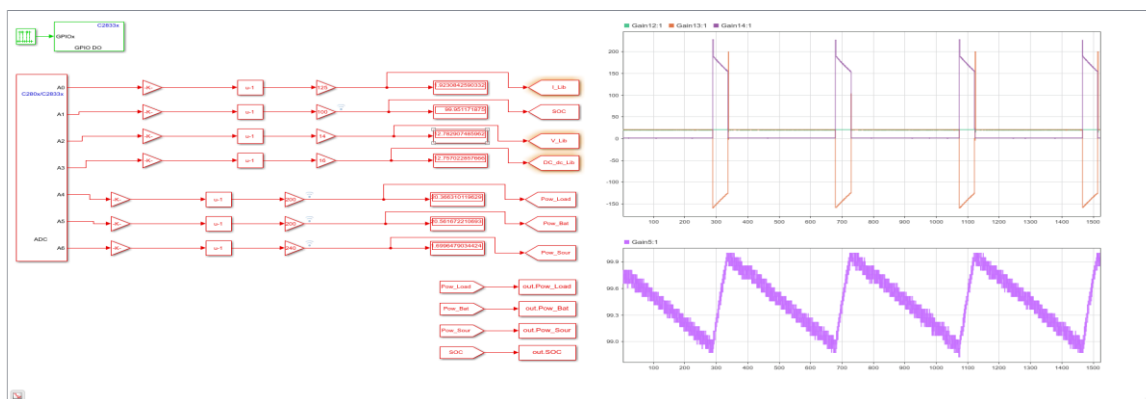
En esta sección se muestran los resultados primero por simulación en Typhoon HIL es decir planta y controlador en el sistema. Posteriormente se muestran los resultados experimentales es decir planta en Typhoon HIL y control en la DSP, para verificar la correcta operación de la batería en sus dos modos.

Resultados simulados en Typhoon HIL

En este apartado se muestran los resultados del sistema simulado en el entorno Typhoon HIL, todo el sistema incluyendo los controladores están programados en el software de Typhoon y el canal de comunicaciones para una visualización más amplia están programados en el software Simulink. Tal como se aprecia en la **Figura 40** lado izquierdo, lo que se obtiene en Simulink es tan solo las señales analógicas, de salida para el análisis como son; la potencia de la carga, la potencia de la batería, y la potencia de la fuente respectivamente, ya que la tasa de refresco del osciloscopio del SCADA del propio Typhoon es demasiado alta, y no se puede apreciar de forma tal que, se pueda realizar un análisis de las respuestas graficas del sistema simulado en Typhoon HIL.

Figura 40

Sistema simulado en Typhoon HIL, visualizado en Simulink



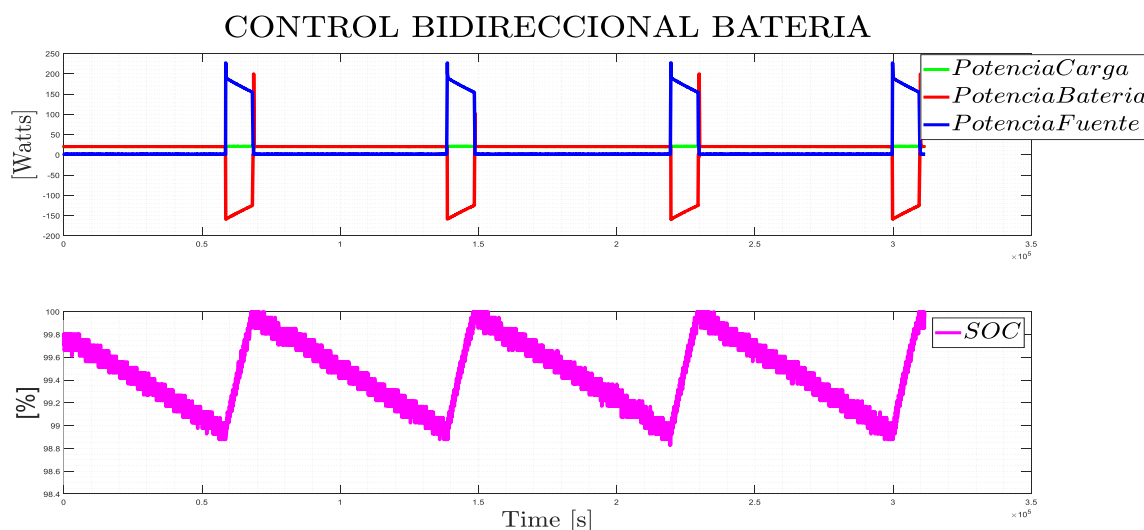
Nota. Datos recibidos en Simulink desde Typhoon HIL

En la **Figura 41** se muestra las respuestas de la simulación del sistema dentro del software Typhoon HIL, la carga conectada en el bus es de 8Ω , en la parte superior se distingue las respuestas de las salidas de potencias en la carga (verde), en la batería (roja), y en el generador (azul), cuando la batería está entregando energía al bus (hasta $0.6 \cdot 10^{-5}$ s), la potencia en la carga (verde) es igual a la potencia de la batería (roja) mientras que el generador está en 0 W. Cuando existe un cambio en el modo de operación ($0.6 \cdot 10^{-5}$ a $0.9 \cdot 10^{-5}$) el controlador empieza a cargar la batería entonces la potencia en la carga se mantiene constante porque no ha cambiado, mientras que la potencia en la batería toma valores negativos por el cambio de la dirección de la corriente, y la potencia en el generador es la suma de los módulos de las potencias tanto en la carga como en el bus. Como se puede comprobar en las mediciones de la **Tabla 3**.

Si bien es cierto que existen picos de potencias en periodos de tiempo muy cortos, estos se dan sea en la batería o en el generador y no se aprecian en la potencia del bus de carga lo que garantiza un suministro estable de potencia hacia las cargas.

Figura 41

Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC con 8Ω de carga Typhoon



Nota. Se hizo más tiempo de simulación para diferenciar del apartado anterior

Tabla 3

Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga

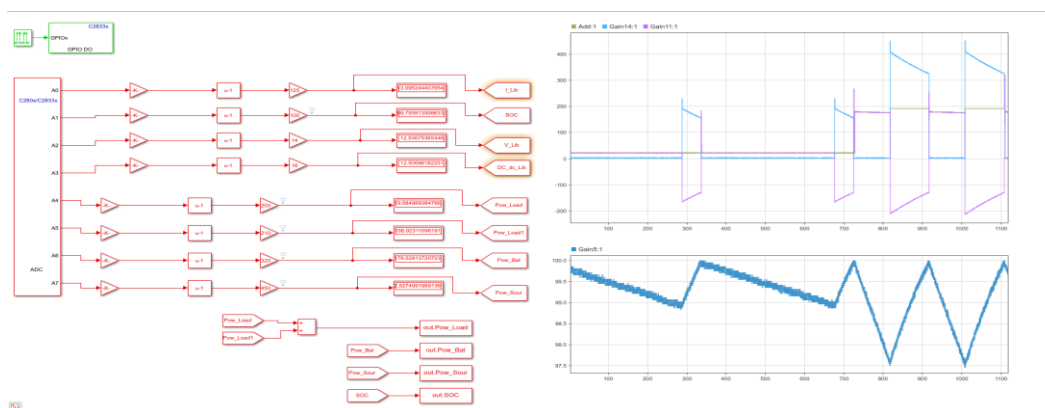
Tiempos [s] e^5	Potencia Carga [W]	Potencia Batería [W]	Potencia Generador [W]	SOC%
1.3-1.4	21.05	-157.8	187.8	99.88
2.1-2.2	21.05	-158.1	188.02	99.88
3.0-3.1	21.05	-155.89	179.2	99.88

Nota. Como la carga no varía en el bus las respuestas son cíclicas con variaciones de potencia de hasta 9 Watts, sin embargo, el objetivo principal de control se mantiene

En la **Figura 42** se puede observar el mismo sistema pero sometido a cambios en la demanda de energía o carga del bus, esto se logra al aumentar una resistencia de 1Ω en paralelo, lo que implica una resistencia equivalente de 0.8Ω , aumentando la demanda de energía en el bus, de la misma forma se implementa solo la lectura de los datos analógicos desde el software Typhoon y el traslado de estos datos hacia el Workspace de Matlab, para una visualización y análisis de estas respuesta de manera más adecuada.

Figura 42

Interfaz de simulación desde Typhoon HIL, respuesta en Simulink

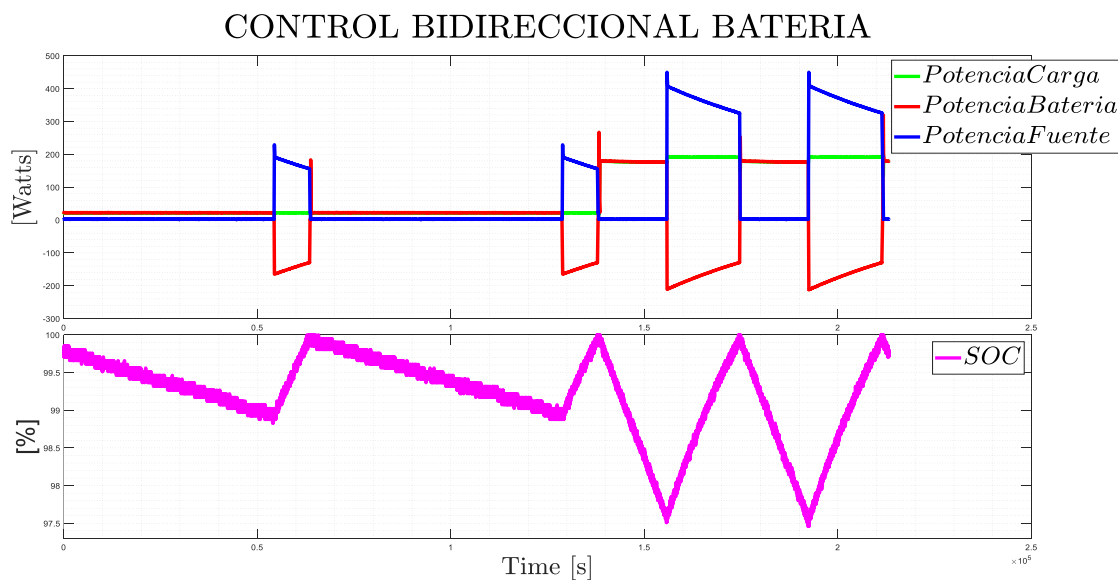


Nota. Se verifica que el canal de comunicación está enviando datos

La **Figura 43** muestra las potencias en la carga del bus o demanda eléctrica (verde), la potencia en la batería (roja) y en el generador (azul), cuando se presenta un cambio en la demanda de energía al aumentar una carga en paralelo al bus a los 1.3×10^{-5} s, lo que significa un aumento en las potencias de carga a (191.7 W) y de la batería entregando más para abastecer la demanda a un valor igual al de la carga del bus. Se puede notar que a los 1.7×10^{-5} s la batería se descargó completamente por lo tanto durante el período de 1.5×10^{-5} a 1.7×10^{-5} s, la batería se carga entonces el generador entrega la potencia necesaria para abastecer la carga del bus más la potencia requerida por la batería. La **Tabla 4** muestra la operación de modo carga y descarga de la batería frente a cambios en la demanda eléctrica o carga en el bus. Se valida el balance de potencias con la ecuación (12).

Figura 43

Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC con variación de carga Typhoon



Nota. Se colocó un aumento de una carga en paralelo, para así visualizar el aumento de energía en el bus de carga

Tabla 4

Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga

Tiempos	Potencia Carga	Potencia Batería	Potencia Generador	SOC%
[s] e^5	[W]	[W]	[W]	
1.2-1.3	21.93	-162.5	189.6	99.88
1.5-1.7	191.7	-207.9	402.1	97.51
1.9-2.1	191.6	-208.3	404.3	97.46

Nota. Como la carga varía en el bus las respuestas de potencia también varían de acuerdo con la energía requerida en el bus de carga, teniendo variaciones de hasta 3 Watts

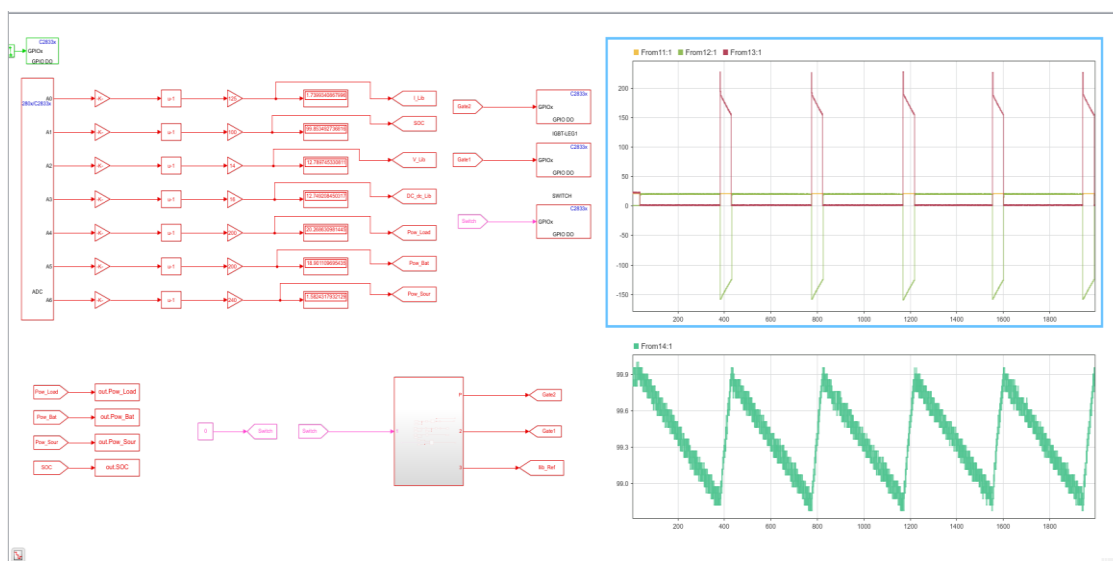
Resultados experimentales en Typhoon HIL H402 y DSP

En la **Figura44** muestra interfaz de comunicación entre el sistema Typhoon HIL, DSP y la interfaz de monitoreo. La planta y el sistema de conversión DC/DC se encuentran en el sistema físico Typhoon HIL H402, mientras que los controladores están programados en la tarjeta DSP. Un sistema de monitoreo y supervisión están en el SCADA de Typhoon, y un sistema de envío de datos para graficar y analizar posteriormente está en el software Simulink.

Al igual que el caso anterior se evalúa primero con una carga conectada al bus de 8Ω , y posteriormente se analiza el desempeño frente a cambios de demanda, lo que significa que, cuando la demanda lo requiera el sistema entra en modo descarga o carga.

Figura 44

Interfaz de envío y recepción de datos desde Typhoon HIL hacia Simulink



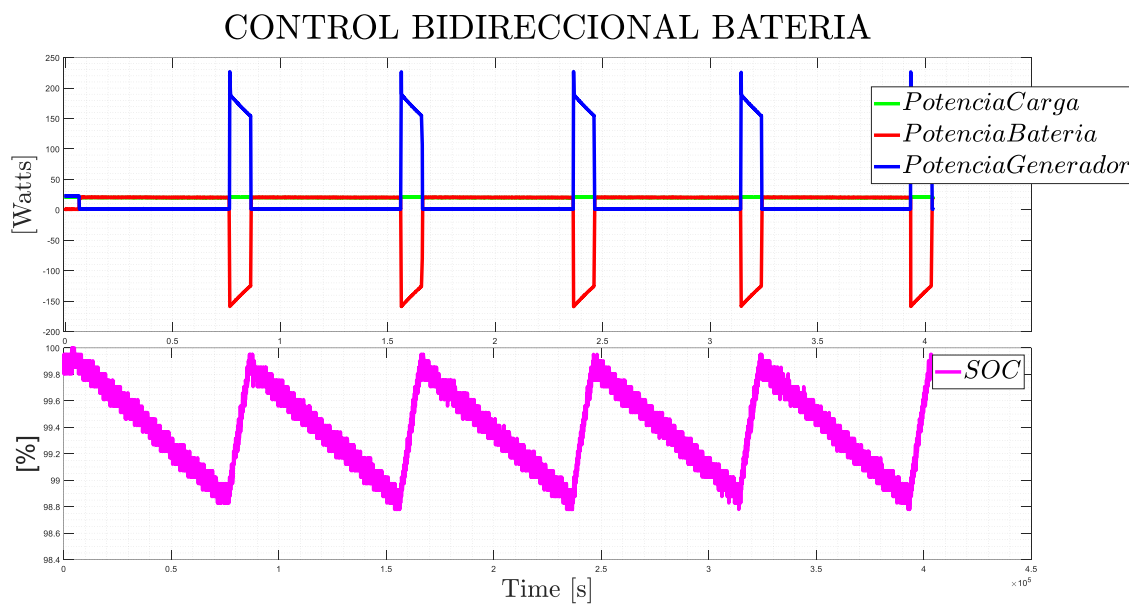
Nota. Al igual que el anterior apartado, se dio más tiempo de operación para diferenciar de los resultados simulados.

En la **Figura 45** se muestran las potencias en la carga del bus (verde), potencia en la batería (roja), potencia en el generador (azul) y se analiza el balance de potencia, que se logra con el eficiente diseño del Control Bidireccional para una Batería. Se analiza el intervalo de tiempo con una carga resistiva constante de 8Ω , implantado en físico en Typhoon HIL. En $2.3 e^5$ s la batería está descargada lo que provoca un cambio en el modo de operación por lo tanto en el intervalo de 2.3 a $2.4 e^5$ s, la potencia en la carga del bus es de 20.85W, mientras que la batería se está cargando a una potencia de -157.6 el signo es negativo por su modo de operación, se puede notar que la potencia del generador es la suma de la demanda eléctrica y el consumo de la batería equivalente a 185.8W. Se puede observar que el controlador permite garantiza una potencia constante en la carga, cuando la demanda requiere que la batería entre en modo carga, la potencia de esta toma valores negativos por la dirección de la corriente, y la potencia del generador debe soportar la carga de la batería y la potencia del bus.

El estado de carga SOC sube y baja de acuerdo con el cambio que hace la potencia de la batería, lo que indica que, el controlador está trabajando en los dos modos (carga y descarga) y de forma bidireccional. La **Tabla 5** muestra el balance de potencia en distintos puntos de operación frente a carga constante de 8Ω .

Figura 45

Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC con 8Ω de carga experimental



Nota. En las respuestas experimentales, también se colocó al principio solo una carga de 8Ω , y como el controlador va midiendo a cada periodo de muestreo, en tiempo real, lo que implica mayores recursos por parte del computador ya que a la vez está corriendo Matlab, Simulink, Editor Esquemático de Typhoon, HIL SCADA, y todos los complementos adicionales para la comunicación y visualización.

Tabla 5

Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga

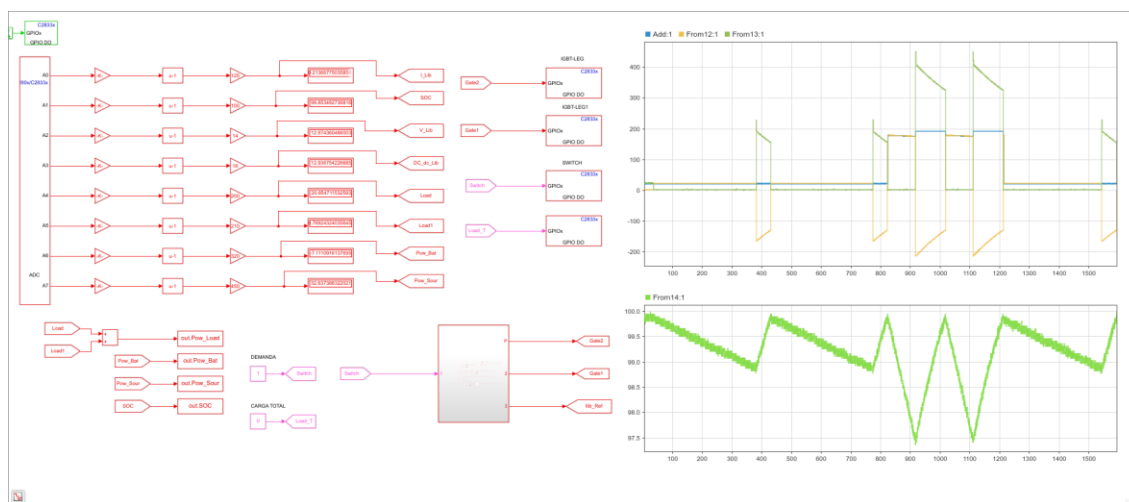
Tiempos	Potencia Carga	Potencia Batería	Potencia Generador	SOC%
[s] e^5	[W]	[W]	[W]	
2.3-2.4	20.85	-157.6	185.8	99.78
3.1-3.2	20.95	-155.1	185.3	99.78
3.9-4.0	20.85	-156.4	186.3	99.78

Nota. Como la carga no varía en el bus las respuestas son cíclicas con variaciones de potencia de hasta 8.75 Watts, sin embargo, el objetivo principal de control se mantiene, mientras está en línea en tiempo real.

Continuando con el análisis de resultados, como se ve en la **Figura 46**, se tiene la variación de la demanda de energía en el bus de carga, conectando una carga de 1Ω , en paralelo con la de 8Ω ya existente, dando como resultado una resistencia equivalente de 0.8Ω , lo que implica una mayor demanda de energía por el paso de corriente en el bus, entonces cuando la batería está en modo descarga o en modo entrega de energía de hacia el bus, la potencia de esta es igual a la potencia en la carga, y cuando la demanda requiere que la batería cambie a modo carga, se observa que, la potencia en la batería cambia de signo, y la potencia del generador debe suministrar tanto a la carga de la batería como la potencia en el bus de carga.

Figura 46

Interfaz de envío y recepción de datos desde Typhoon HIL hacia Simulink



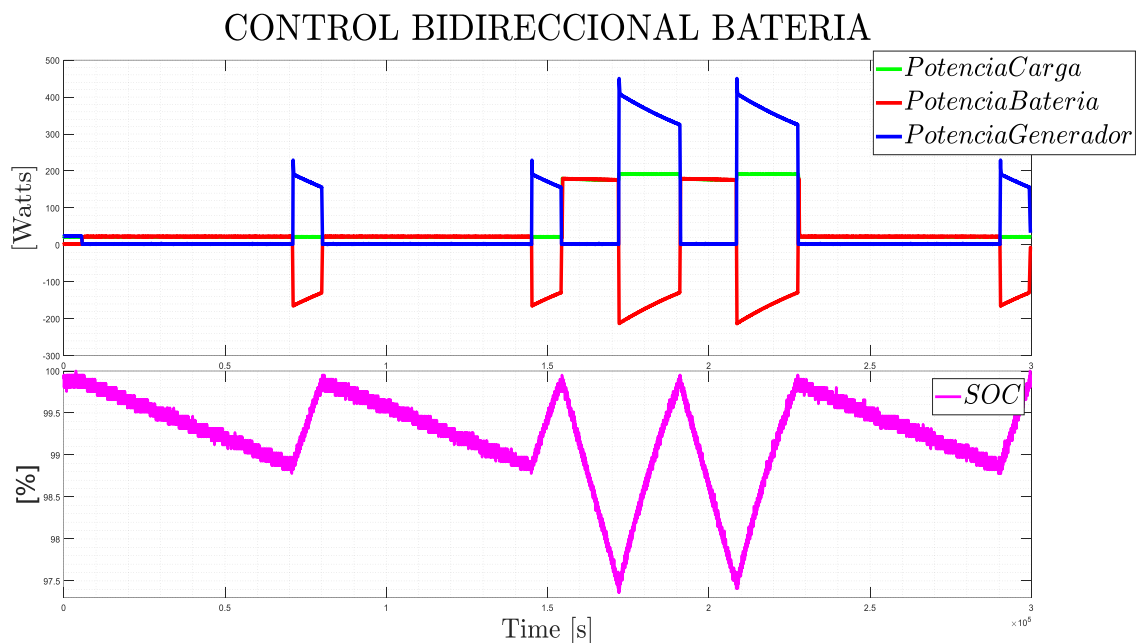
Nota. En esta imagen se verifica los cambios de carga en el bus que se dan con el fin de validar el desempeño del controlador

La **Figura 47** muestra las potencias en la carga del bus o demanda eléctrica (verde), la potencia en la batería (roja) y en el generador (azul), cuando se presenta un cambio en la demanda de energía al aumentar una carga en paralelo al bus a los $1.7 e^5$ s, lo que significa un aumento en las potencias de carga a (195.5 W) y de la batería entregando más para abastecer la demanda a un valor de -212.5 W, por su modo de carga. Se puede notar que a los $1.7 e^5$ s la batería se descargó completamente por lo tanto durante el período de 1.7 a $1.9 e^5$ s, la batería se carga entonces el generador entrega la potencia necesaria para abastecer la carga del bus más la potencia requerida por la batería. La **Tabla 6** muestra la operación de modo carga y descarga de la batería frente a cambios en la demanda eléctrica o carga en el bus. Se valida el balance de potencias con la ecuación (12).

Así mismo se observa que el estado de carga se ve alterado cuando existe un aumento en la demanda de energía en el bus de carga, y la descarga se produce de manera más abrupta y de la misma forma la carga tarda un poco más en llegar a su nivel de referencia.

Figura 47

Respuestas de Potencias Carga, Batería, Generador, y SOC, variación de carga experimental



Nota. En esta parte del experimento se colocó una carga en paralelo a la salida del bus de carga con la finalidad de evaluar el desempeño del controlador

Tabla 6

Respuestas de potencias y SOC para simulación 8Ω de carga

Tiempos [s] e^5	Potencia en la Carga [W]	Potencia Batería [W]	Potencia Generador [W]	SOC%
1.4-1.5	21.82	-162.8	188.7	99.78
1.7-1.9	191.5	-212.5	405.8	97.36
2.0-2.1	191.5	-208.6	405.5	97.41
2.9-3.0	21.72	-163.7	190.1	98.78

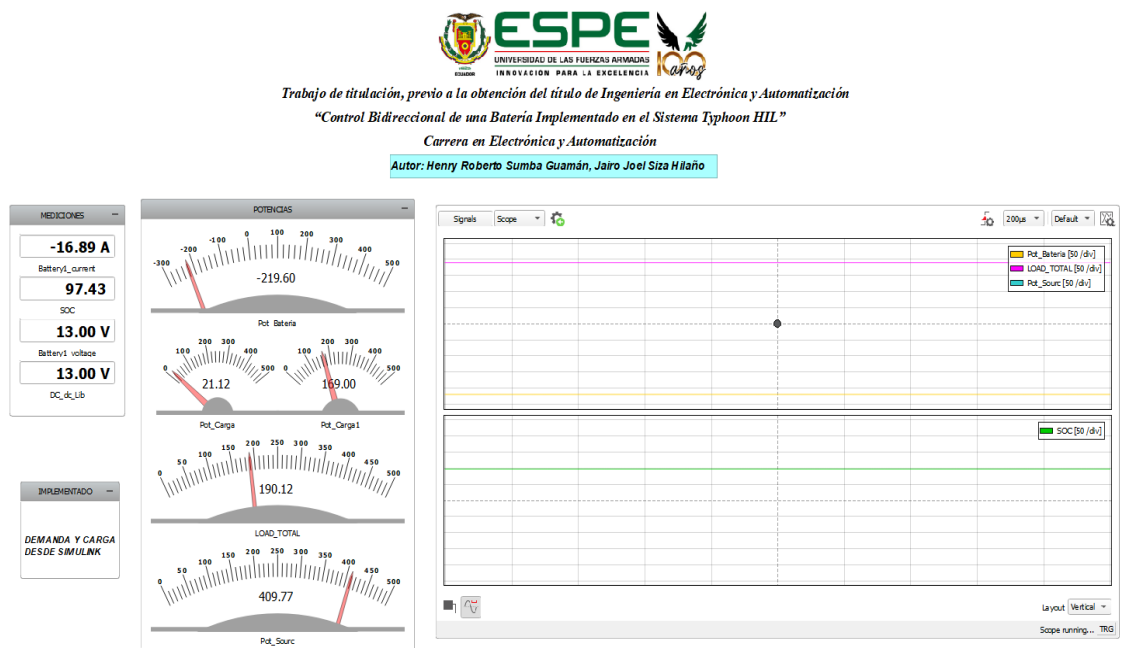
Nota. Ahora la carga varía en el bus y las respuestas toman las mismas formas de como varia la energía en el bus de carga, y si se regresa a la carga del principio el controlador también hace que las potencias tomen valores de acuerdo con la demanda por parte de la carga.

HMI SCADA de supervisión del controlador bidireccional.

En este apartado se muestra mediante la **Figura 48**, el HMI SCADA realizado en el entorno Typhoon HIL, específicamente en el software HIL SCADA, donde se visualizan las distintas señales y mediciones de la planta como del controlador bidireccional para una batería.

Figura 48

HMI SCADA implementado experimentalmente en entorno Typhoon HIL



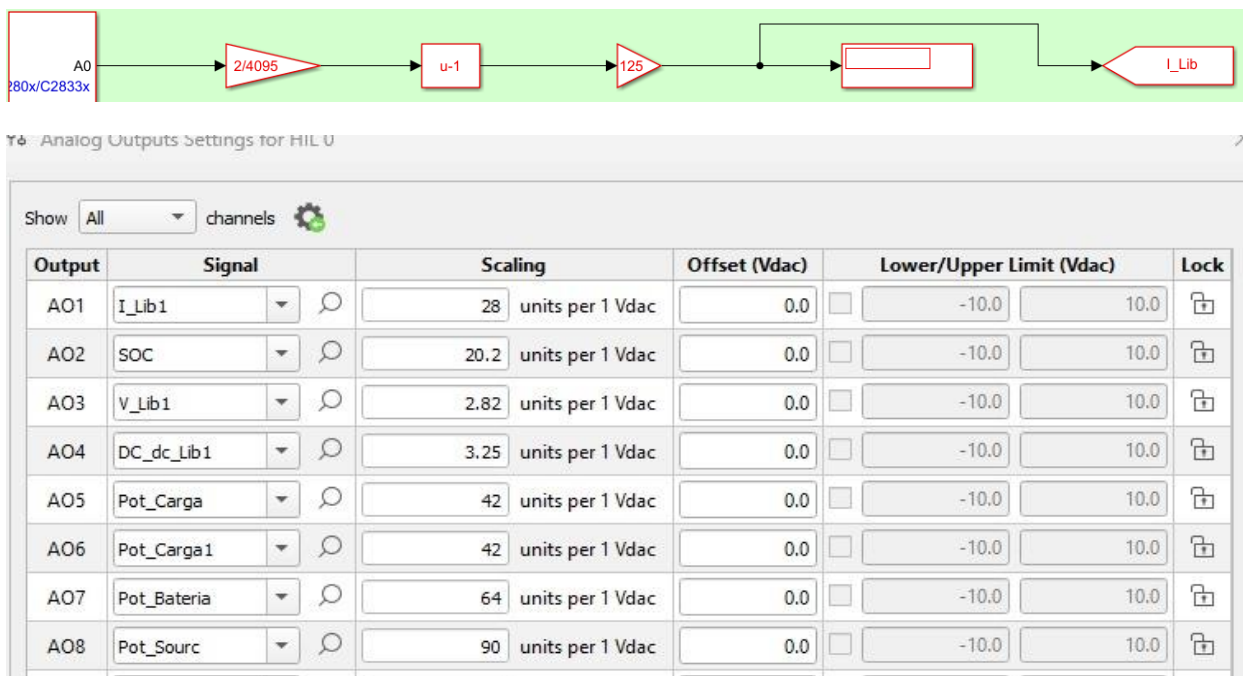
Nota. Las señales deben estar acondicionadas de tal forma que no exista errores en la experimentación y las lecturas de los datos por ambos softwares (Simulink y Typhoon HIL)

Acondicionamiento de señales por parte de Simulink y Typhoon HIL

En la **Figura 49** se muestra el acondicionamiento de las señales que se utilizan para el desarrollo de este trabajo de investigación. Primero, al momento de realizar el canal de comunicación en Simulink se procede a sacar la señal del ADC, para luego ser tratada como se ve en la imagen, las ganancias finales se dan en concordancia con la imagen correspondiente a la tabla de señales de Typhoon HIL, este apartado puede variar según, el tipo de planta o proceso, el rango de operación de las plantas, el tipo de controlador que se aplique, entre otros factores.

Figura 49

Acondicionamiento de señales para comunicación entre entrenos Matlab Simulink Typhoon HIL



Nota. Valores de acondicionamiento de señales exclusivo para esta tesis

Capítulo VII

Conclusiones

El controlador bidireccional propuesto en este trabajo de investigación, considera el estado de carga de la batería SOC, como entrada al controlador, es decir toma en cuenta el porcentaje de carga que posee la batería en tiempo real, para de esta forma brindar un mejor desempeño a la salida del mismo, si el estado de carga está por debajo de un cierto valor de referencia, el controlador activa modo carga y el convertor trabaja como Buck, caso contrario el controlador activa modo descarga y el convertor trabaja en modo Boost.

Este trabajo también propone soluciones para el entorno de programación dentro del Editor Esquemático de Typhoon HIL, ya que, durante el desarrollo de esta tesis, se logró un artificio de conexión del componente IGBT Leg, el único componente disponible para la realización del convertor Buck-Boost, en este entorno, llegando a la conclusión de que, se puede implementar cualquier convertor DC/DC dentro la Solución Typhoon HILL.

En cuanto al diseño e implantación del controlador bidireccional de baterías en sus dos modos de operación, se concluye que este diseño se puede llevar a aplicaciones industriales, puesto que los controladores fueron probados en dispositivos de control reales, que se incluyen dentro de los paquetes dispositivos que conforman los convertidores comerciales.

La estrategia de controladores tradicionales PI's para el convertor Buck-Boost DC/DC implementado tanto en simulación y de forma experimental, presenta un buen desempeño, en condiciones de carga constante en el bus, así como en condiciones de cambio de cargas, este desempeño también se ve reflejado cuando el convertor está operando en ambos modos, Boost cuando entrega energía al bus, y Buck cuando recibe energía desde el generador.

Durante la experimentación del sistema en lazo abierto, se comprobó que, los parámetros del sistema de identificación de Matlab, arrojan valores con los cuales se obtuvo constantes de sintonización Lambda, los cuales al ser implementados en simulación no brindaron el desempeño requerido para este tipo de controladores, por lo que se optó por una

sintonización de manera heurística, tomando en cuenta que las respuestas de los controladores deben ser rápidas y en concordancia con la velocidad de conmutación de los IGBT's.

Debido a que el Control Bidireccional aplicado en el conversor DC/DC, está sintonizado utilizando técnicas heurísticas, la evaluación aplicada a este controlador se da mediante cambios en el bus de carga, lo que implica un cambio en la salida de del controlador, cuando el bus requiere de más potencia por parte de la batería, esta entrega lo que el bus exige, de tal manera que la potencia en la carga se mantenga constante, y si la batería es la que requiere de energía desde el generador, este provee tanto a la batería y también al bus de carga.

Durante la implementación del sistema de almacenamiento y la interfaz de electrónica de potencia (conversor DC/DC Buck-Boost) dentro de la unidad Typhoon HIL H402, se configuraron las características físicas y químicas de la batería, así como los parámetros que se van a medir mediante la colocación de puntas de prueba, configurando también las entradas digitales de cada uno de los IGBT's y las de los Switch encargados de conexión y desconexión al sistema de la carga y del generador, cabe indicar que en esta interfaz no debe estar el controlador, puesto que este se lo programara en el software Simulink.

Recomendaciones

Para la conexión física del dispositivo Typhoon HIL H402, con la PC1 se requiere de actualizaciones de licencia, y de firmware, de acuerdo con el dispositivo adquirido, este proceso se realiza cada vez que se cambie de unidad PC.

Como el software de Typhoon HIL, junto con el software Simulink, requieren de muchos recursos por parte de la memoria RAM de la PC, se recomienda, utilizar dos PC, ya que una puede contener la conexión del sistema Typhoon HIL y la otra contener la programación del controlador en Simulink.

Durante la instalación de los programas y complementos para Matlab Simulink se recomienda la instalación de estos, actualizados para cada versión de Matlab, de lo contrario el software no reconocerá la tarjeta DSP, y las librerías en Simulink aparecerán, pero el canal de comunicaciones arrojará errores.

Para este caso de estudio se recomienda usar valores de cargas resistivas de potencia constante ya que esta implementación está limitada solo hasta la parte de corriente DC

Actualmente, la estrategia de control tradicional PI para convertidores DC/DC son de alguna forma los más utilizados para este tipo de sistemas, sin embargo existen también algunas alternativas dentro de la literatura y algunos comprobados mediante experimentación que también brindan un buen desempeño, tales como el control MPPT para convertidores de tipo Boost, o los denominados controles Droop para distribución equitativa de potencias, o uno más avanzado como el MPC implementado ya en un nivel de gestión de energía para microrredes aisladas.

Finalmente, se tiene de referencia trabajos anteriores que están orientados hacia la creación de una Microrred completa dentro del sistema Hardware in the Loop, en este caso particular el sistema Typhoon HIL, dentro de esta misma línea se encamina el trabajo de investigación y experimentación realizado en esta tesis, es decir uno de los trabajos futuros a los que puede aplicarse esta investigación, es al desarrollo e implementación de un sistema de

gestión de energía de una microrred, donde esta cuenta con sistemas de generación como paneles fotovoltaicos, generadores eólicos, generadores Diesel, entre otros, y sistemas de almacenamiento como un banco de baterías, todos estos sistemas interconectados entre sí y controlados de tal manera que alimenten a una carga domestica completa, y además puedan interconectarse a la red de distribución de energía del país.

Bibliografía

- Ballester Eduard, .. P. (2011). Electrónica de Potencia Principios Fundamentales y Estructuras Básicas. En B. Piqué, *Electrónica de Potencia Principios Fundamentales y Estructuras Básicas* (págs. 222-309). Barcelona: MARCOMBO S.A.
- Chipuel Perez, A. Á. (11 de 2016). *Pistas Educativas*. Obtenido de Pistas Educativas:
<https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/602/537>
- Constanza Ahumada., R. C. (2016). Secondary Control Strategies for Frequency Restoration in Islanded Microgrids with Consideration of Communication Delays. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1430-1441.
- Deluque Pinto, A. P. (2022). Sistema de gestión de energía para una microrred con almacenamiento en baterías e incorporación de biomasa. *Tecnológicas*, 25-54.
- Engineering, P. (12 de 6 de 2021). *Design and simulation of Bidirectional DC-DC buck and boost with Battery Control in MATLAB/Simulink*. Obtenido de Battery DC-DC Converters:
<https://www.youtube.com/watch?v=g94G2ouQ8QU>
- F. D. Esteban, F. M. (2021). Control of a DC-DC Dual Active Bridge Converter in DC Microgrids Applications. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 19*, 1261-1269.
- Flores Torres Ángel David, E. C. (2019). Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost. *Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C*, 65-80.
- Gonzalez Santacruz, C. A. (17 de 12 de 2015). *Repositorio Institucional*. Obtenido de Universidad Distrital Francisco José caldas:
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3663>
- Gutiérrez, L. F. (7 de 2017). *Escuela Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones*. Obtenido de Universidad de cantabria:
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/11434/395027.pdf?sequence=1&isAllowed=n>

- HIL, T. (24 de 08 de 2023). *Typhoon HIL*. Obtenido de Typhoon HIL: <https://www.typhoon-hil.com>
- Instruments, T. (24 de 08 de 2023). *Texas Instruments*. Obtenido de TMDSCNCD28335: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28335?keyMatch=TMDSCNCD28335>
- Javier Sebastián, D. M.-y. (2021). *Estudio de los modos de conducción del convertidor Buck-Boost versátil*. Obtenido de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/60211>
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Mexico: TKM Productions.
- Padrón Jabib, F. A. (11 de 2013). *UPB*. Obtenido de Universidad Pontificia Bolivariana: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/1536>
- Peña Ordoñez, C. P. (24 de 05 de 2011). *Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de Biblioteca: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11805>
- Rivera Yepes, J. A. (6 de 2018). *UTP*. Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira: <https://hdl.handle.net/11059/9425>
- Sanhueza Hormazábal, R. G. (2014). *Electronica de Potencia (Dossier-Final- 02-05-2016) R. Sanhueza*. Obtenido de Electronica de Potencia (Dossier-Final- 02-05-2016) R. Sanhueza: [http://sb.uta.cl/libros/Electronica%20de%20Potencia%20\(Dossier-Final-%2002-05-2016\)%20R.%20Sanhueza.pdf](http://sb.uta.cl/libros/Electronica%20de%20Potencia%20(Dossier-Final-%2002-05-2016)%20R.%20Sanhueza.pdf)
- Santillan Tituaña, A. A. (Julio de 2016). *Dipòsit Digital Universida de Barcelona*. Obtenido de Dipòsit Digital Universida de Barcelona: <http://hdl.handle.net/2445/101966>
- Spitalnik, J. (2004). Demanda de Energía y Calidad de Vida en las Américas. *International Joint Meeting Cancun 2004*, 11-14.
- Villarruel Parra, A. (6 de 2010). *Instituto Politécnico Nacional*. Obtenido de Técnicas de Control PWM para un Convertidor Multiniveles Híbrido: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/9506/272.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Anexos